



Tesis - TL142501

ANALISA PENGARUH PENGELASAN *MULTIPLE REPAIR* BAJA KARBON RENDAH TERHADAP SIFAT MEKANIK, STRUKTUR MIKRO DAN TEGANGAN SISA

DIMAS TRIYOGA
2713201002

DOSEN PEMBIMBING
Prof.Dr.Ir.Sulistijono, DEA

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNOLOGI METALURGI MANUFAKTUR
JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015



Thesis - TL142501

**THE ANALYSIS EFFECT OF MULTIPLE REPAIR
WELDING TO LOW CARBON STEEL ON
MECHANICAL PROPERTIES, MICROSTRUCTURE
AND RESIDUAL STRESS**

DIMAS TRIYOGA
2713201002

Supervisor
Prof.Dr.Ir.Sulistijono, DEA

MASTER PROGRAM
AREAS OF EXPERTISE MANUFACTURE METALLURGICAL TECHNOLOGY
DEPARTEMENT OF MATERIAL AND METALLURGY TECHNIQUE
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)
di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:
Dimas Triyoga
NRP. 2713201002

Tanggal Ujian: 27 Juli 2015
Periode Wisuda: Semester Genap 2014/2015

Setujui oleh:

Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA
NIP. 196203261987011001

(Pembimbing)

Dr. Lukman Noerochim, S.T., M.Sc. Eng
NIP. 197703132003121001

(Penguji I)

Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng
NIP. 197605282002121003

(Penguji II)

Dr. Ing. Victor Yuardi R, ST., M.SC
NIP. -

(Penguji III)

Direktur Program Pascasarjana,

Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
NIP. 196404061990021001

ANALISA PENGARUH PENGELASAN *MULTIPLE REPAIR* BAJA KARBON RENDAH TERHADAP SIFAT MEKANIK, STRUKTUR MIKRO DAN TEGANGAN SISA

Nama : Dimas Triyoga
NRP : 2713201002
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi, ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA
NIP : 196203261987011001

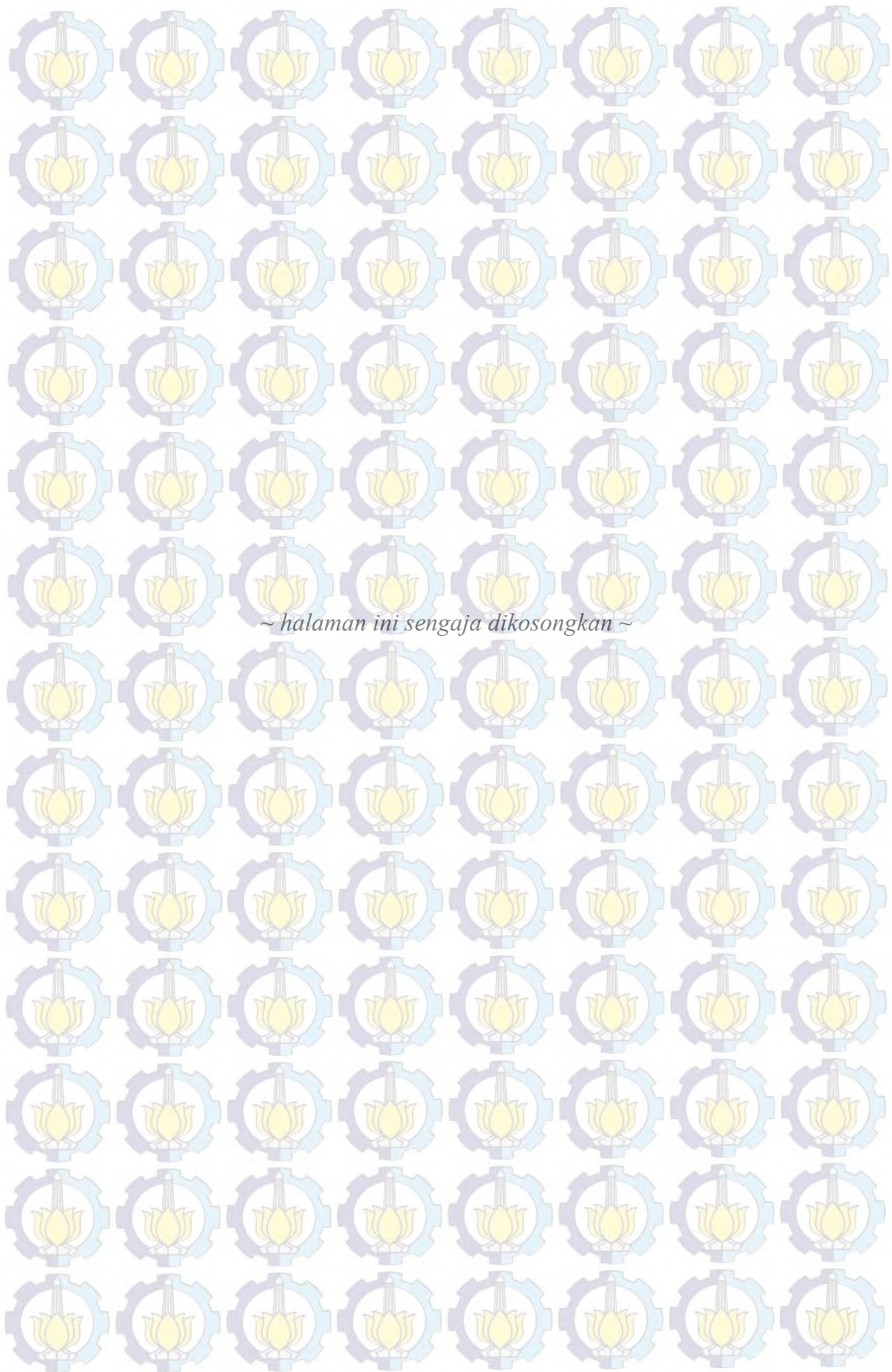
ABSTRAK

Kemungkinan terjadi kesalahan dalam proses pengelasan tidak dapat dihindari dan berakibat fatal bagi komponen. Untuk mengatasinya diperlukan *repair*, apabila kesalahan dalam proses pengelasan dilakukan berulang kali maka perlu dilakukan *multiple repair welding* pada sambungan las tersebut. Akibat dari *multiple repair welding* yang dilakukan akan berpengaruh besar terhadap sifat mekanik dan struktur mikronya.

Dalam penelitian ini melakukan investigasi mengenai pengelasan *multiple repair* dengan metode las SMAW dan metode *repair gouging* pada pelat baja ASTM A36 dengan dimensi 400 x 300 x 9 mm yang diasumsikan terjadi cacat las pada sambungan lasnya dengan variasi 1x, 2x dan 3x serta lokasi *repair* pada daerah mahkota las hingga ke bagian tengah logam las (*filler*) pada setiap variasi pengelasan *repair*. Elektroda las yang digunakan adalah E7016 dan elektroda untuk proses *repair* adalah elektroda karbon.

Berdasarkan hasil analisa hasil uji mekanik yaitu dimulai dari pengujian tarik ditemukan bahwa nilai rata-rata tarik berturut-turut dimulai dari tanpa *repair* hingga *repair* 3x yaitu sebesar 430.32 MPa, 456.93 MPa, 479.26 MPa dan 511.17 MPa. Sedangkan persentase nilai rata-rata kekerasan menunjukkan kenaikan yaitu sebesar 0.9% (*base metal*), 1.14% (HAZ) dan 9.3% (*weld metal*) pada masing-masing variabel dimana nilai rata-rata kekerasan tertinggi ditunjukkan pada spesimen *repair* 3x di area *weld metal* sebesar 215 HVN. Melalui analisa pengamatan tampilan makro didapatkan persentase lebar HAZ pada spesimen *repair* 1x, 2x dan 3x dibandingkan dengan tanpa *repair*, yaitu sebesar 7.4 %, 10.44% dan 13.51% serta hasil analisa tegangan sisa memiliki nilai rata-rata yang lebih tinggi seiring dengan bertambahnya jumlah *repair* yaitu sebesar 91.94 MPa (*base metal*), 89.91 MPa (HAZ) dan 137.552 MPa (*weld metal*). Hasil analisa pengamatan melalui struktur mikro menghasilkan perbandingan yang berbanding lurus dengan hasil pengujian mekanik yang menampilkan gambar dengan ditandai adanya perubahan persentase pertumbuhan butir pada HAZ yaitu sebesar 9%, 9.56% dan 10.13%. Semua hasil analisa didapatkan bahwa semakin banyaknya jumlah *repair* maka akan merubah ukuran butir dan menghasilkan tegangan sisa yang akan mempengaruhi sifat mekaniknya, melalui hasil analisa tegangan sisa juga dapat disimpulkan untuk banyaknya *repair* sebaiknya dilakukan sebanyak 2x dikarenakan nilai tegangan sisa yang terlalu tinggi bila lebih.

Kata kunci : Baja ASTM A36, Variasi *multiple repair*, Lokasi *repair*, Uji mekanik, Analisa tegangan sisa dengan XRD, Struktur makro dan mikro.



THE ANALYSIS EFFECT OF MULTIPLE REPAIR WELDING TO LOW CARBON STEEL ON MECHANICAL PROPERTIES, MICROSTRUCTURE AND RESIDUAL STRESS

Name : Dimas Triyoga
NRP : 2713201002
Departement : Material and Metallurgical Engineering, ITS
Supervisor : Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA
NIP : 196203261987011001

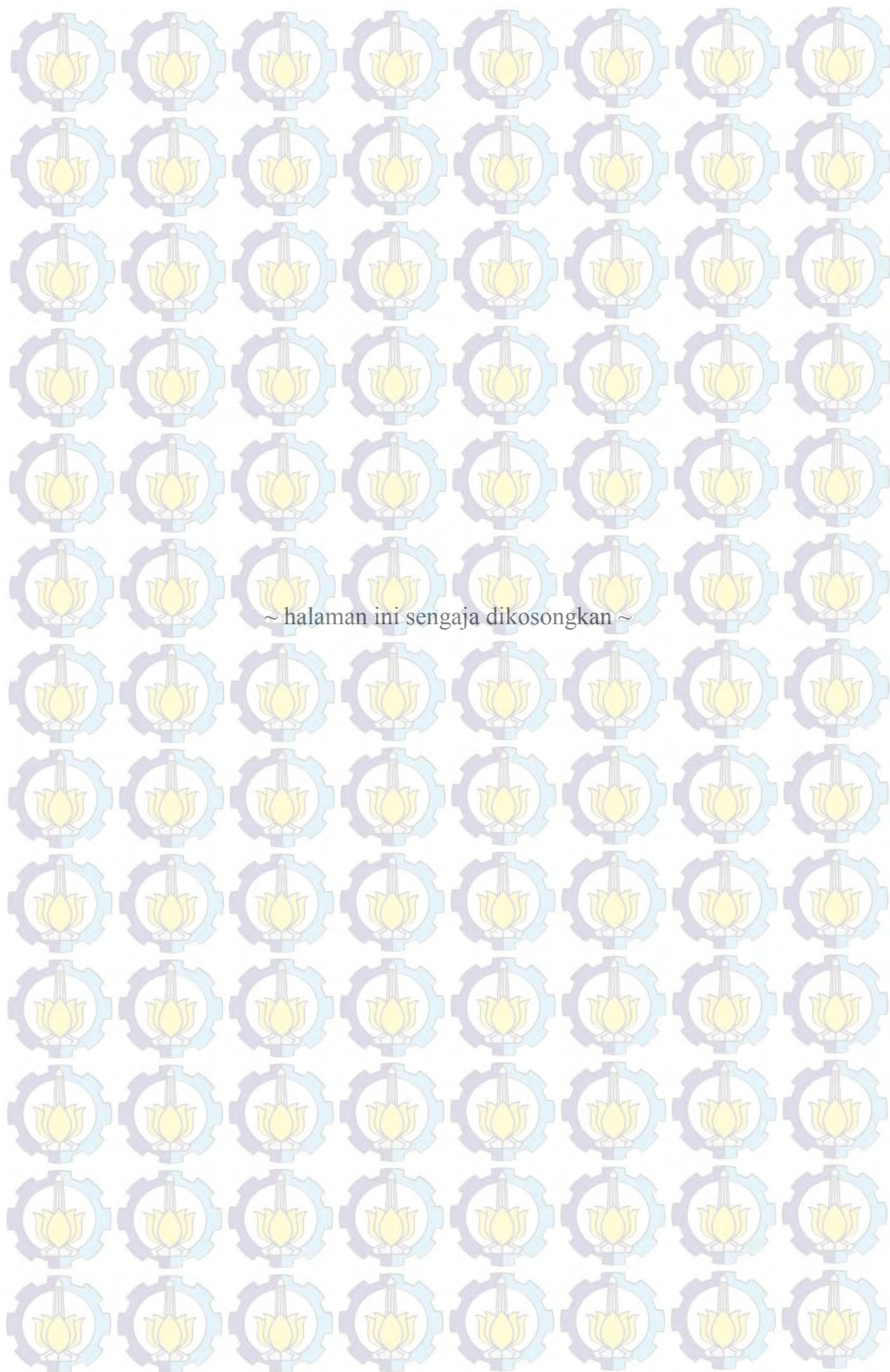
ABSTRACT

The possibility of error in the welding process can't be avoided and could be fatal to the structure itself. In term to overcome this situation a treatment is necessary to repair it, if the errors in the welding process is then repeated to perform multiple weld repair at the joint. Then result of multiple repairs will carried out affect greatly to the mechanical properties and microstructures.

This research was investigating about multiple repair welding where weld defect assumed accour into ASTM A36 steel plate weld joints, 400 x 300 x 9 mm for its dimension. Using SMAW for the weld method and gouging method as the repair weldment. The repair variations are 1x, 2x and 3x along with the repair locations at weld bead to middle of weld metal, respectively. Using E7016 as the weld electrode and carbon electrode for its repair.

Through the all analysis results of mechanical tests, first from tensile tests have found increasing, as the tensile values into repaired 3x compared to non repaired are 430.32 MPa, 456.93 MPa, 479.26 and 511.17 MPa, respectively. Hardness average values have been found increased also at all area along with percentage values are 0.9% (base metal), 1.14% (HAZ) and 9.3% (weld metal), in each variable. The highest hardness have been reached by 3x repaired with 215 HVN at weld metal area. HAZ macro structure analysis have found that width increasingly in each variable, as the average values are 7.4%, 10.44% and 13.51%. Residual stress also found another increasing average values as the same as the repair gouging has been added in number at each variables, as the values showed 91.94 MPa (base metal), 89.91 (HAZ) and 137.552 MPa (weld metal). Microstructure analysis found a straight line comparison along with mechanical tests which by the pictures showed many developments of the HAZ grain size in each variables, those are 9 %, 9.56% and 10.13%. All the result analysis concluded that by the time repair welding has been added in number will increase the size of grain and produce residual stress which will be changing the mechanical properties along with the residual value and it can be concluded that the number of repair welding not to be allowed in 2x for the purpose material, since it was produced bigger values when it was added.

Keywords : ASTM A36 steel, Location of multiple repair welding, Mechanical tests, Residual stress analysis by XRD, Macro and microstructure examination.



KATA PENGANTAR

Puji Syukur atas kehadiran Allah SWT dan juga Shalawat dan salam selalu untuk junjungan kita Nabi Muhammad SAW. Atas berkat rahmat dan hidayah Allah SWT, Alhamdulillah kami dapat menyelesaikan tesis yang berjudul :

”Analisa Pengaruh Pengelasan *Multiple Repair Welding* Baja Karbon Rendah Terhadap Sifat Mekanik, Struktur Mikro dan Tegangan Sisa”

Dalam kesempatan kali ini penulis mengucapkan banyak terima kasih dan penghargaan yang tak terhingga atas segala sesuatu yang diberikan kepada penulis khususnya kepada :

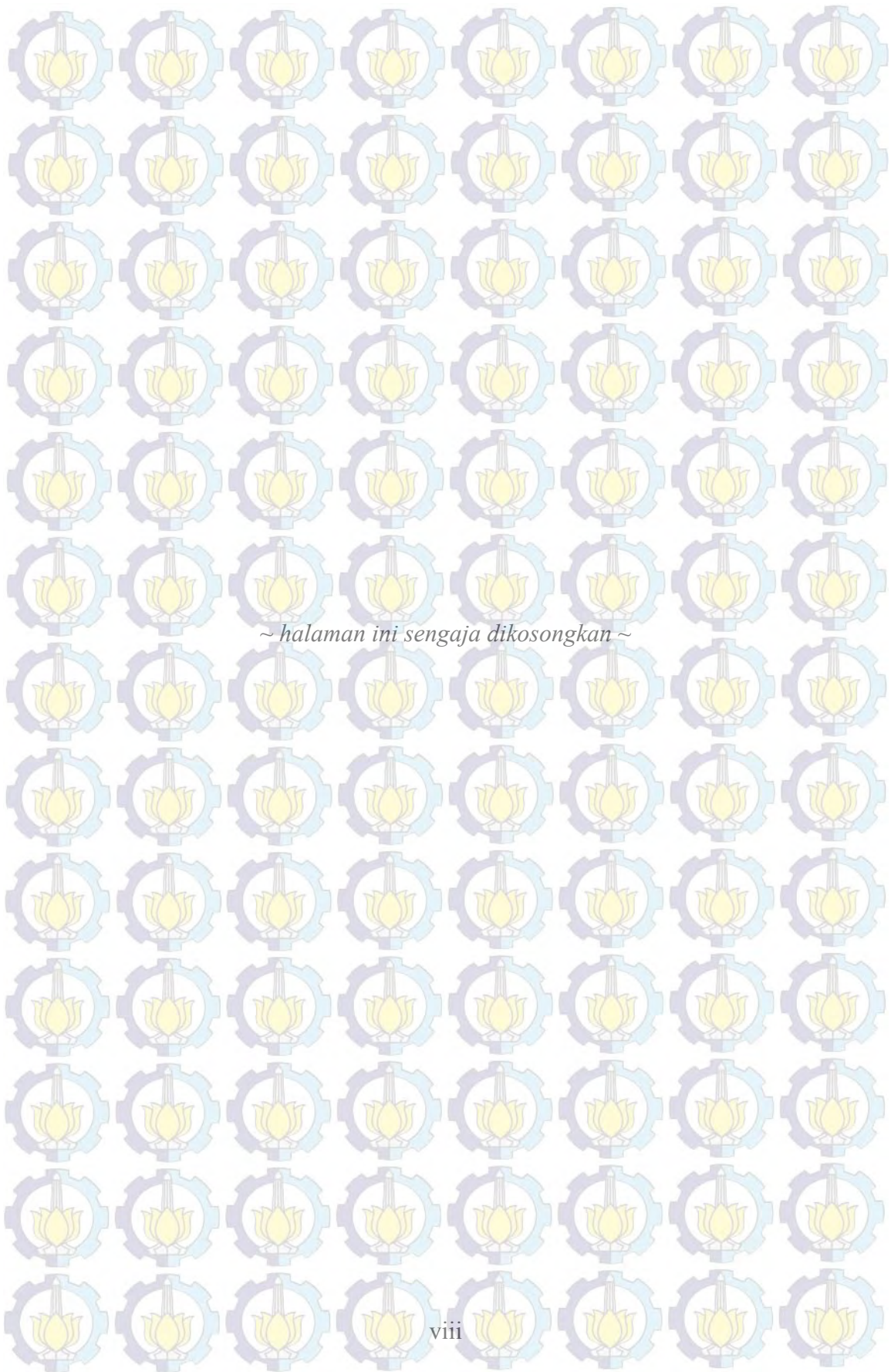
1. Mama, Papah dan kedua kakakku atas do’a, bantuan dan dukungan serta dorongan semangat selama menempuh studi magister Teknik Material dan Metalurgi ITS.
2. Prof. Dr. Ir Sulistijono, DEA selaku dosen pembimbing yang berkontribusi secara langsung dalam memberikan arahan serta masukan selama pengerjaan tesis.
3. Para teman-teman di jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS.
4. Kepada DIKTI terima kasih atas program beasiswa *fresh graduate* yang saya terima untuk menempuh program magister di S2 Teknik Material dan Metalurgi.
5. Seluruh pihak yang turut berkontribusi secara langsung maupun tidak langsung dalam penyelesaian tesis ini.

Penulis menyadari bahwa penulisan tesis ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu penulis sangat mengharap segala bentuk saran dan kritik yang membangun guna penyempurnaan tesis ini.

Sebagai akhir penulis senantiasa berharap bahwa tesci ini dapat bermanfaat khususnya bagi penulis sendiri, dan bagi pembaca pada umumnya.

Surabaya, 27 Juli 2015

Penulis



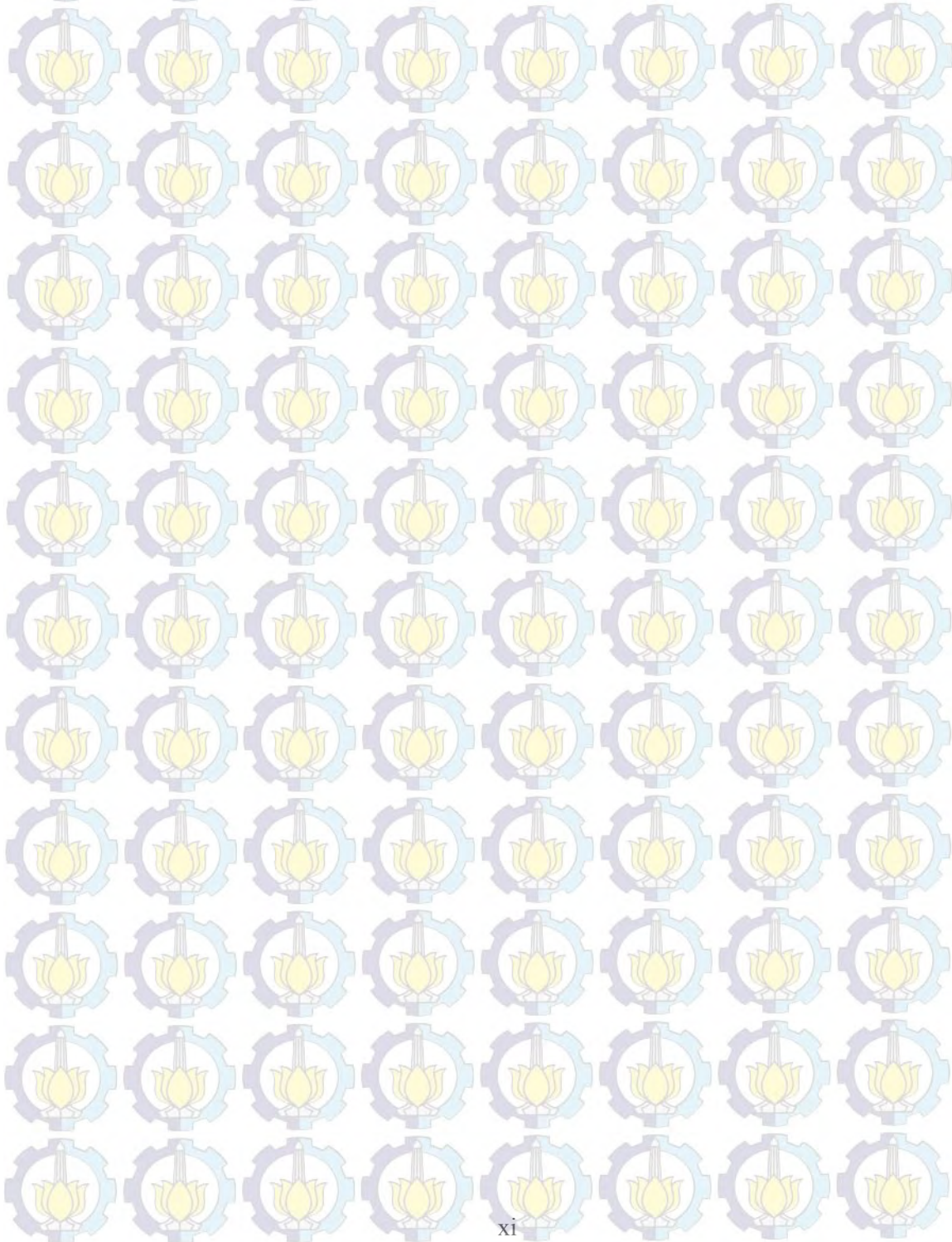
~ halaman ini sengaja dikosongkan ~

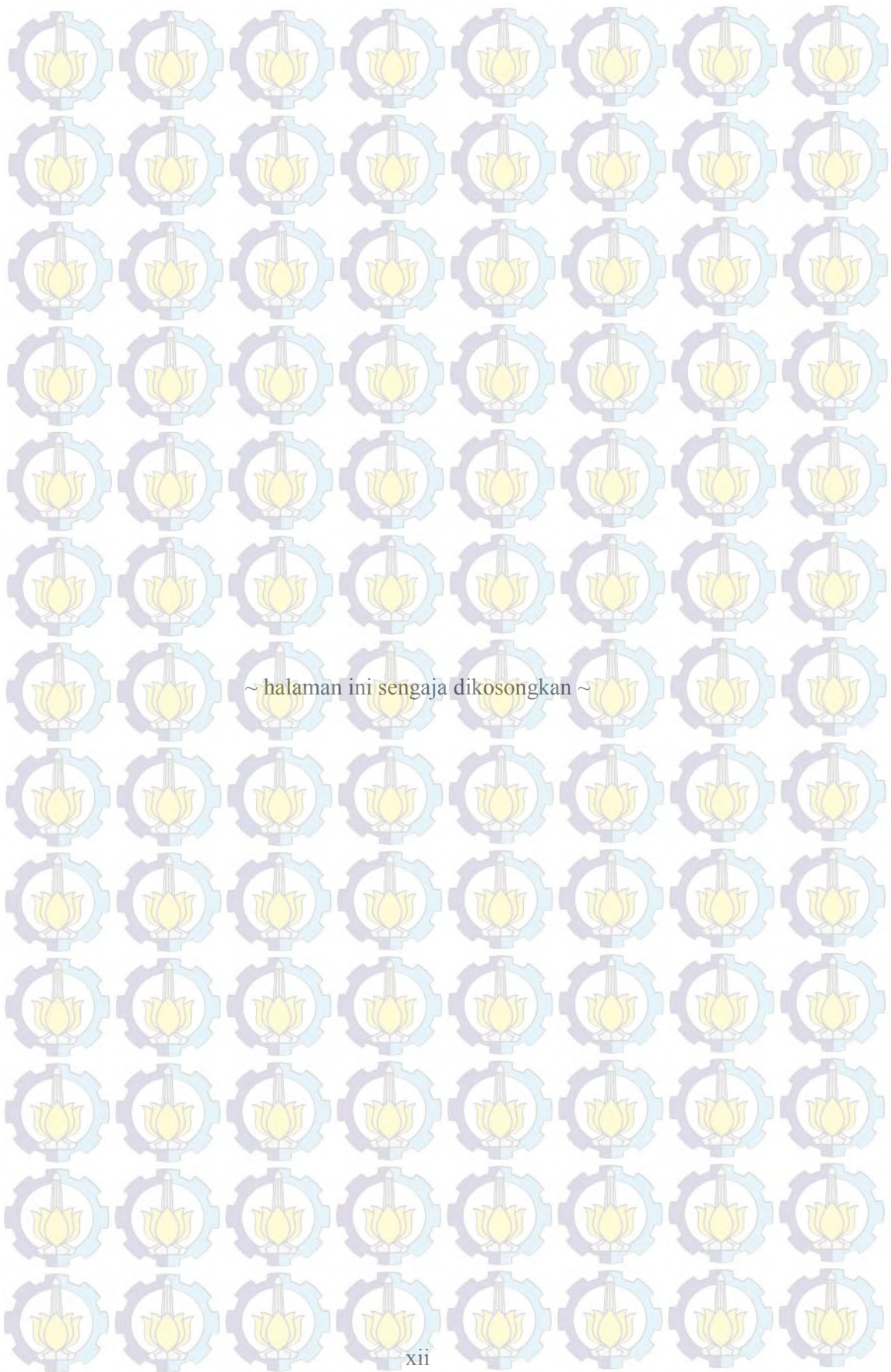
DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	7
2.1 Baja.....	7
2.2 Klasifikasi Baja.....	7
2.2.1 Berdasarkan komposisi kimia.....	7
2.2.1.1 Baja karbon.....	7
2.3 Baja ASTM A36.....	9
2.4 Sifat Mampu Las (<i>Weldability</i>).....	10
2.5 <i>Arc Gouging</i> (Pemotongan Busur Udara).....	11
2.6 Metalurgi Pengelasan.....	11
2.7 Siklus Termal dan Distribusi Temperatur Logam Hasil Lasan.....	13
2.8 Struktur Mikro Daerah Pengaruh Panas / HAZ.....	15
2.9 Pengelasan.....	16
2.10 Proses Las SMAW.....	16
2.11 Elektroda E 7016.....	17

2.12 Fungsi Dari Fluks Elektroda Pada Las SMAW	19
2.13 Persiapan Sisi	20
2.14 Tegangan Sisa	21
2.14.1 Terjadinya tegangan sisa	21
2.14.2 Penyebab terjadinya tegangan sisa	22
2.14.3 Sifat-sifat tegangan sisa	23
2.14.4 Pengaruh tegangan sisa	23
2.15 Pengukuran Tegangan Sisa	23
2.16 Hukum Bragg dan Syarat Difraksi	24
2.17 Analisa Data Difraksi dan Tegangan Sisa dengan Metode Scherer	26
2.18 Hasil Penelitian Sebelumnya	27
BAB III METODE PENELITIAN	41
3.1 Material Penelitian	41
3.2 Parameter Pengelasan	43
3.3 Proses <i>Repair</i>	44
3.4 Pengambilan Spesimen Uji	45
3.5 Pengujian Mekanik	46
3.5.1 Pengujian Tarik	46
3.5.2 Pengujian Kekerasan	49
3.6 Pengujian tegangan sisa menggunakan XRD	50
3.7 Analisa dan Pembahasan	52
3.8 Kesimpulan dan Saran	52
3.9 Diagram Alir Penelitian	53
BAB IV ANALISA DATA PENELITIAN	57
4.1 Analisa Hasil Pengujian Metalografi	57
4.1.1 Analisa hasil pengujian struktur makro	57
4.1.2 Analisa hasil pengujian struktur mikro	59
4.2 Analisa Hasil Pengujian Tarik	67
4.3 Analisa Hasil Pengujian Kekerasan	68
4.4 Analisa Hasil Pengujian Tegangan Sisa Menggunakan XRD	70
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	75
5.1 Kesimpulan	75

5.2 Saran	76
DAFTAR PUSTAKA	78
LAMPIRAN	80
RIWAYAT HIDUP PENULIS	127

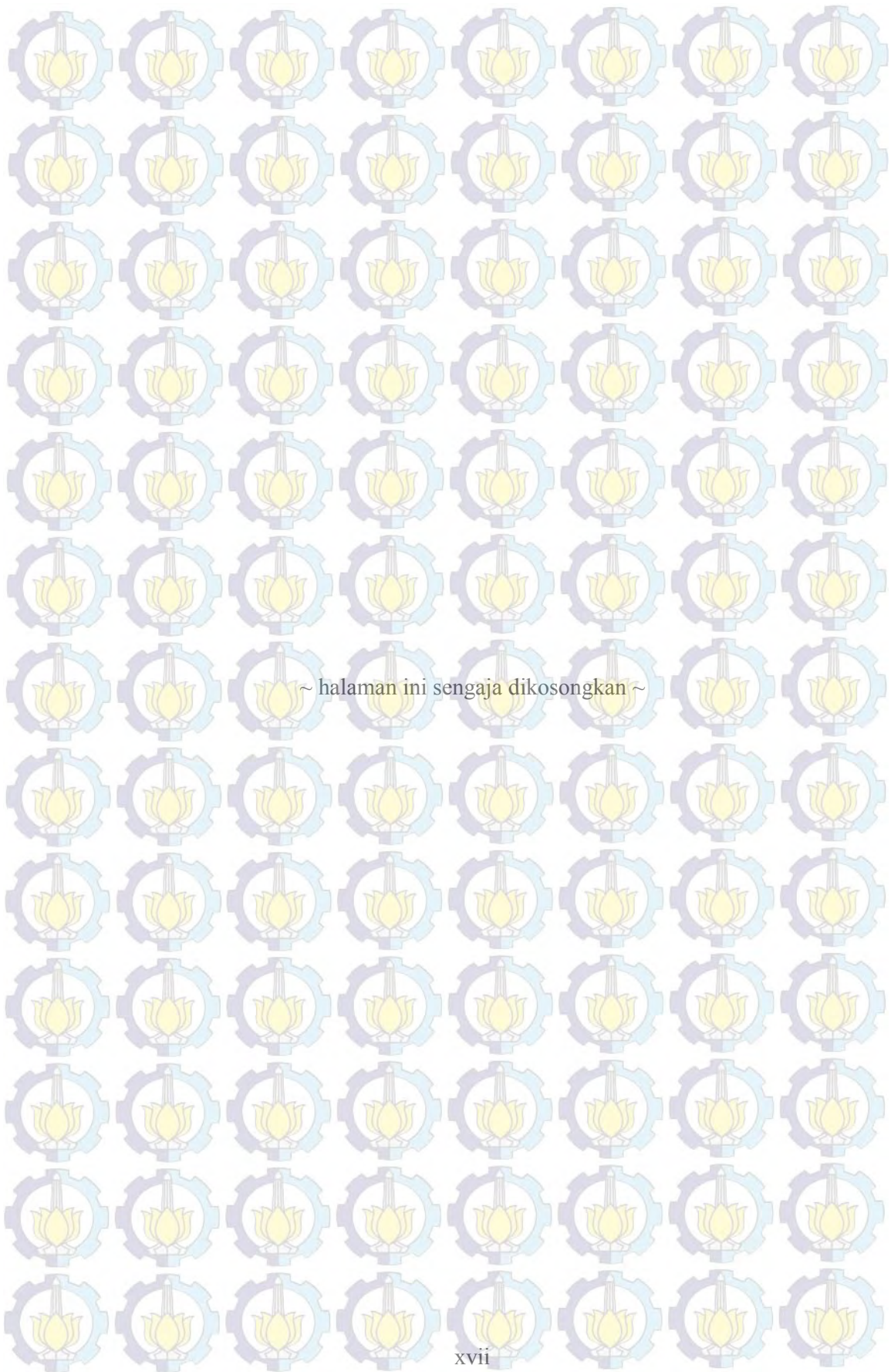




~ halaman ini sengaja dikosongkan ~

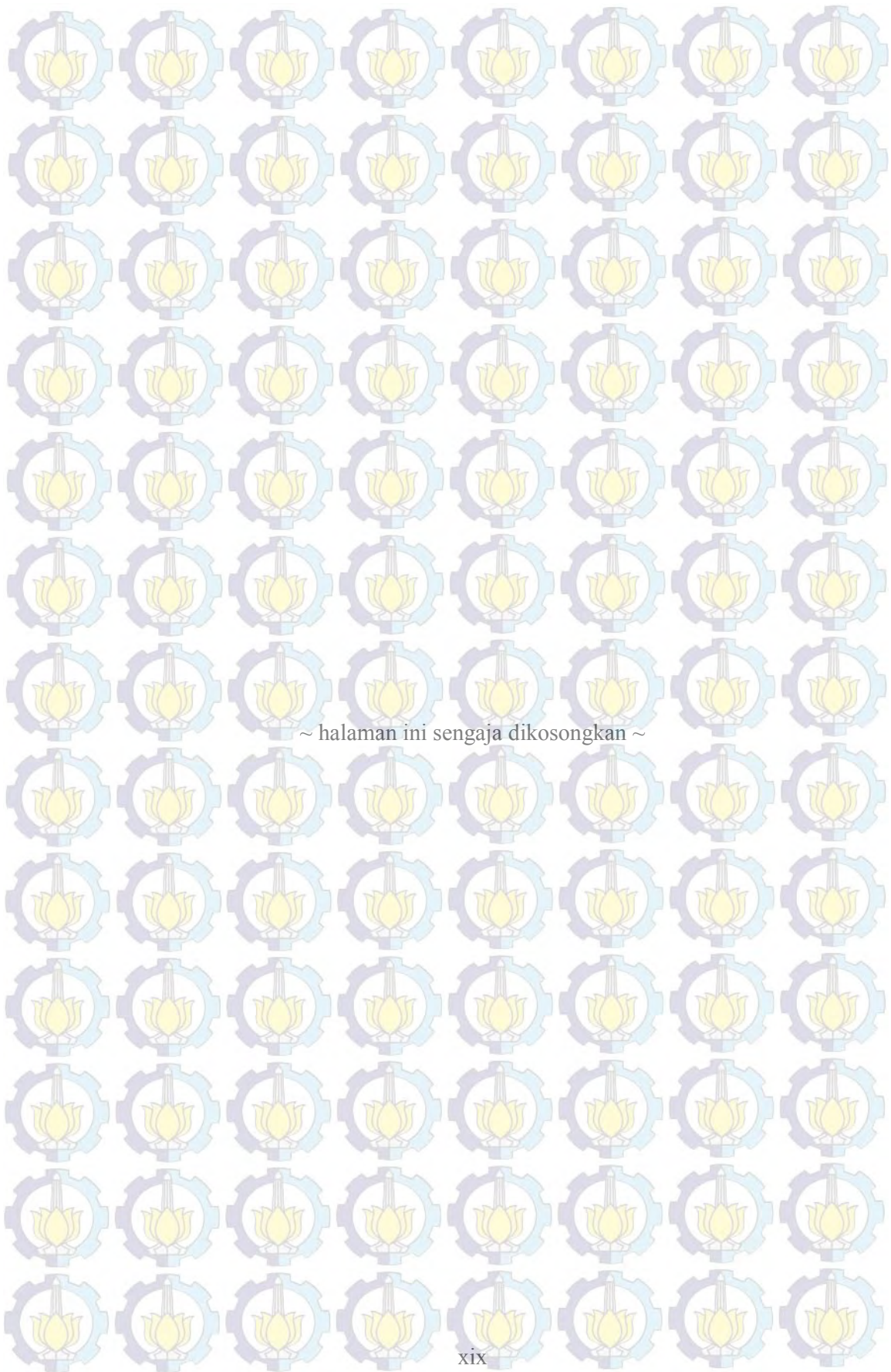
DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi kimia ASTM A36	9
Tabel 2.2 Nilai mekanik ASTM A36	9
Tabel 2.3 Komposisi kimia E7016	18
Tabel 2.4 Hasil penelitian sebelumnya	37
Tabel 3.1 Komposisi kimia ASTM A36	41
Tabel 3.2 Nilai mekanik ASTM A36	41
Tabel 3.3 Komposisi kimia E7016	43
Tabel 3.4 Format <i>record</i> data dimensi aktual spesimen tarik	49
Tabel 4.1 Persentase perbandingan ferit dan perlit serta ukuran butir perlit pada <i>base metal</i>	60
Tabel 4.2 Persentase perbandingan ferit dan perlit serta ukuran butir perlit pada HAZ	62
Tabel 4.3 Persentase perbandingan ferit dan perlit serta ukuran butir perlit pada <i>fusion line</i>	64
Tabel 4.4 Persentase perbandingan ferit dan perlit serta ukuran butir perlit pada <i>weld metal</i>	66



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A. Data dan Grafik Rata-Rata Hasil Uji Tarik	80
Lampiran B. Data dan Grafik Rata-Rata Uji Kekerasan.....	85
Lampiran C. Data dan Grafik Rata-Rata Hasil Uji Tegangan Sisa	95
Lampiran D. Hasil Pengujian XRD	96
Lampiran E. Hasil Olahan Gambar Struktur Mikro	108
Lampiran F. Peralatan dan Perlengkapan Pengelasan	116
Lampiran G. Persiapan Material.....	119
Lampiran H. Pengerjaan <i>Gouging</i> dan Tampilan Hasil Pengelasan Setelah <i>Repair</i>	121
Lampiran I. Pemotongan Material untuk Spesimen Uji dan Permesinan	122
Lampiran J. Peralatan Pengujian	123
Lampiran K. Spesimen Pengujian	125



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Perbaikan pengelasan dapat mempengaruhi suatu hasil produk las untuk dapat menghasilkan komponen yang aman dan mampu digunakan sesuai dengan ketentuannya. Apabila kualitas pekerjaan yang dihasilkan jelek dan menimbulkan kegagalan, maka klaim asuransi yang akan dibayar besar dan muncul ketidakpuasan pada pelanggan sehingga berujung pada kerugian yang sangat besar.

Dalam pengelasan, kekuatan sambungan harus diperhatikan dan dijamin kekuatannya, sehingga diharapkan minimal kekuatannya sama dengan kekuatan *base metal*. Namun dalam setiap aktifitas pekerjaan termasuk salah satunya adalah proses pengelasan selalu ada resiko gagal dalam proses pengerjaannya sehingga diperlukan perbaikan atau *repair*.

Berbagai kemungkinan terjadi kesalahan dalam proses pengelasan tidak dapat dihindari dan akan berakibat fatal bagi komponen itu sendiri. Hal tersebut diatas dapat terjadi akibat *human error* atau kesalahan prosedur. Seperti kesalahan sudut pengelasan dan konsentrasi tukang las mulai menurun sehingga terjadi *defect*. Untuk mengatasinya diperlukan perlakuan *repair*, apabila kesalahan dalam proses pengelasan dilakukan berulang kali maka perlu dilakukan *multiple repair welding* pada sambungan las tersebut. Akibat dari *multiple repair welding* yang dilakukan akan berpengaruh besar terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pada material induk itu sendiri.

MacGaughy (1990) menyatakan bahwa pada perbaikan hasil produk las pada API 5L X65 menghasilkan tegangan sisa yang dapat merusak, hal ini dikarenakan daerah HAZ yang semakin melebar dengan ditandai perbaikan butiran pada daerah tersebut sehingga nilai mekanik ikut menurun.

Miftahul Ulum (2011) menyatakan penambahan lapisan logam las pada hasil perbaikan produk las pada baja A572 mengakibatkan area HAZ yang

semakin melebar yang berindikasi pada nilai mekanik material yang semakin menurun.

Mulyaningsih (2009) menyatakan bahwa resiko gagal dalam proses pengelasan akan berpotensi menimbulkan konsentrasi tegangan yang nantinya akan menimbulkan kegagalan pada struktur tersebut. Dalam hal ini perlakuan *repair* memiliki peranan penting untuk mendukung kualitas hasil lasan. Disamping itu, perlakuan *repair* juga memiliki pengaruh yang besar bagi daerah HAZ (*Heat Affected Zone*) dan sambungan las sehingga perlu menjadi hal yang patut diperhatikan

Berbagai penelitian mengenai penelitian perbaikan hasil pengelasan banyak dilakukan hanya sebatas simulasi menggunakan program komputer *finite element* tetapi sangat sedikit sekali yang melihat dari segi nilai mekanik dan hasil struktur mikro secara aktual sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut (vega, 2008).

Berdasarkan uraian diatas maka penelitian mengenai *multiple repair welding* perlu diteliti lebih lanjut sehingga diharapkan akan didapat informasi mengenai perubahan sifat mekanik dan struktur mikro dari sambungan las material baja karbon rendah akibat *Multiple Repair Welding*. Sehingga dari penelitian ini nantinya dapat diketahui batas perlakuan *repair* yang masih bisa dilakukan.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun perumusan masalah dari penelitian ini diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana hasil pengamatan metalografi berupa hasil makro etsa dan struktur mikro berikut dengan fasa sambungan las pada material baja karbon rendah yang dilas tanpa *repair* dibandingkan dengan sambungan las yang terkena *multiple repair*
2. Bagaimana pengaruh kekuatan tarik sambungan las pada material baja karbon rendah yang dilas tanpa *repair* dibandingkan dengan sambungan las yang terkena *multiple repair*

3. Bagaimana pengaruh kekerasan area sambungan las pada material baja karbon rendah yang dilas tanpa *repair* dibandingkan dengan area sambungan las yang terkena *multiple repair*
4. Bagaimana persebaran tegangan sisa yang dihasilkan pada material baja karbon rendah yang dilas tanpa *repair* dibandingkan dengan sambungan las yang terkena *multiple repair*

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan agar penelitian dapat berjalan secara fokus dan terarah serta dapat mencapai tujuan yang diinginkan adalah sebagai berikut :

1. Parameter diluar dari arus las dan voltase selama pengelasan diasumsikan tetap
2. Hasil penyambungan las diasumsikan terdapat cacat didalam logam las sehingga diperlukan metode *Multiple Repair*
3. Efek regangan plastik dan laju regangannya akibat pengaruh panas pengelasan diabaikan
4. Alat ukur maupun peralatan serta perlengkapan terkait yang digunakan diasumsikan terkalibrasi dan homogen
5. Pengaruh kondisi lingkungan diabaikan

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini diantaranya adalah :

1. Menganalisa hasil pengamatan metalografi sambungan las baik secara makro etsa dan struktur mikro pada material baja karbon rendah yang dilas tanpa repair dibandingkan dengan sambungan las yang terkena *multiple repair*.
2. Menganalisa pengaruh kekuatan tarik sambungan las pada material baja karbon rendah yang dilas tanpa repair dibandingkan dengan sambungan las yang terkena *multiple repair*.

3. Menganalisa pengaruh kekerasan pada sambungan las pada material baja karbon rendah yang dilas tanpa repair dibandingkan dengan sambungan las yang terkena *multiple repair*.

4. Menganalisa pengaruh tegangan sisa yang dihasilkan pada material baja karbon rendah yang dilas tanpa *repair* dibandingkan dengan sambungan las yang terkena *multiple repair*.

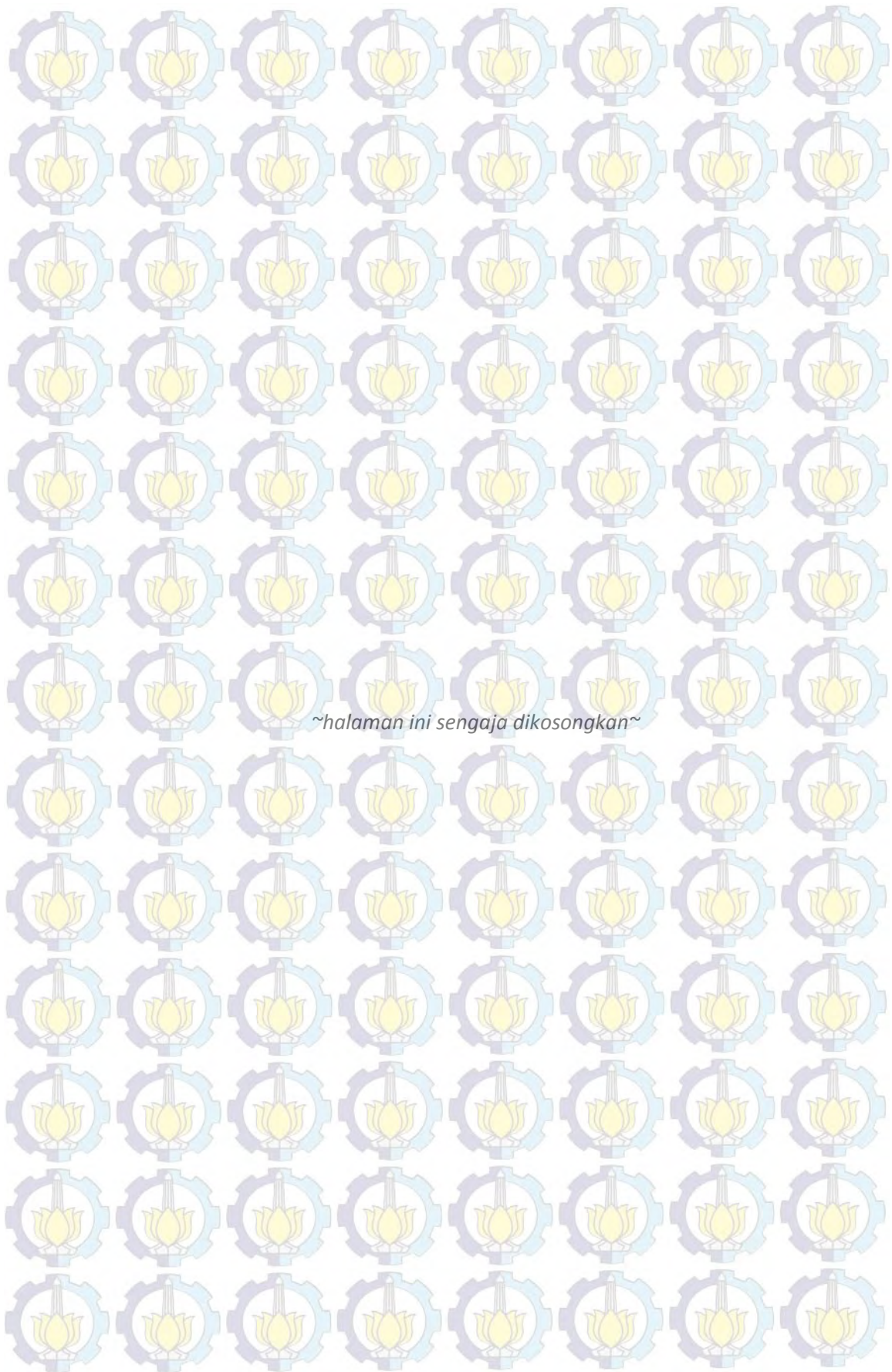
1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari pelaksanaan penelitian ini diantaranya adalah :

1. Memberikan nilai akademis atau memperoleh data tentang pengaruh yang ditimbulkan dari efek *Multiple Repair Welding* pada material baja paduan rendah terhadap sifat mekanik dan struktur mikronya.

2. Bahan referensi dalam proses *repair welding* pada pekerjaan *heat exchanger, pressure vessel* dan struktur lain berbahan material baja paduan rendah atau karbon rendah.

3. Menunjang penelitian-penelitian lain lebih lanjut tentang pekerjaan las yang bermanfaat bagi dunia pendidikan maupun dunia industri di kemudian hari.



BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Baja

Baja adalah logam paduan, logam besi sebagai unsur dasar dengan beberapa elemen lainnya, termasuk karbon. Kandungan unsur karbon dalam baja berkisar antara 0.2% hingga 2.1% berat sesuai *grade*-nya. Elemen berikut ini selalu ada dalam baja diantaranya adalah karbon, mangan, fosfor, sulfur, silikon dan sebagian kecil oksigen, nitrogen serta aluminium.

Selain itu, ada elemen lain yang ditambahkan untuk membedakan karakteristik antara beberapa jenis baja diantaranya adalah mangan, nikel, krom, molybdenum, boron, titanium, vanadium dan niobium. Melalui variasi kandungan karbon dan unsur paduan lainnya, berbagai jenis kualitas baja bisa didapatkan.

Baja merupakan bahan dasar vital untuk industri. Semua segmen kehidupan, mulai dari peralatan dapur, transportasi, generator pembangkit listrik, sampai kerangka gedung dan jembatan menggunakan baja. Besi baja menduduki peringkat pertama di antara barang tambang logam dan produknya melingkupi hampir 90 % dari barang berbahan logam.

2.2 Klasifikasi baja

2.2.1 Berdasarkan komposisi kimia

2.2.1.1 Baja karbon

Menurut pendefinisian *ASM handbook* vol.1:148 (1993), baja karbon dapat diklasifikasikan berdasarkan jumlah persentase komposisi kimia karbon dalam baja yakni sebagai berikut :

1. Baja Karbon Rendah (*Low Carbon Steel*)

Baja karbon rendah merupakan baja dengan kandungan unsur karbon dalam struktur baja kurang dari 0,3% C. Baja karbon rendah ini memiliki ketangguhan dan keuletan tinggi akan tetapi memiliki sifat kekerasan dan ketahanan aus yang rendah. Pada umumnya baja

jenis ini digunakan sebagai bahan baku untuk pembuatan komponen struktur bangunan, pipa gedung, jembatan, bodi mobil, dan lain-lainnya.

2. Baja karbon sedang (*Medium carbon steel*)

Baja karbon sedang merupakan baja karbon dengan persentase kandungan karbon pada besi sebesar 0,3% C – 0,59% C. Baja karbon ini memiliki kelebihan bila dibandingkan dengan baja karbon rendah, baja karbon sedang memiliki sifat mekanis yang lebih kuat dengan tingkat kekerasan yang lebih tinggi dari pada baja karbon rendah. Besarnya kandungan karbon yang terdapat dalam besi memungkinkan baja untuk dapat dikeraskan dengan memberikan perlakuan panas (*heat treatment*) yang sesuai. Baja karbon sedang biasanya digunakan untuk pembuatan poros, rel kereta api, roda gigi, baut, pegas, dan komponen mesin lainnya.

3. Baja karbon tinggi (*High carbon steel*)

Baja karbon tinggi adalah baja karbon yang memiliki kandungan karbon sebesar 0,6% C – 1,4% C. Baja karbon tinggi memiliki sifat tahan panas, kekerasan serta kekuatan tarik yang sangat tinggi akan tetapi memiliki keuletan yang lebih rendah sehingga baja karbon ini menjadi lebih getas. Baja karbon tinggi ini sulit diberi perlakuan panas untuk meningkatkan sifat kekerasannya, hal ini dikarenakan baja karbon tinggi memiliki jumlah martensit yang cukup tinggi sehingga tidak akan memberikan hasil yang optimal pada saat dilakukan proses pengerasan permukaan. Dalam pengaplikasiannya baja karbon tinggi banyak digunakan dalam pembuatan alat-alat perkakas seperti palu, gergaji, pembuatan kikir, pisau cukur, dan sebagainya.

2.3 Baja ASTM A36

ASTM A36 memiliki *tensile* : 400–550 MPa, *Yield* : min 250 MPa, *Elongation* : min 20% seperti yang disyaratkan pada ASTM pada Tabel 2.1. Baja jenis ini biasa digunakan untuk *structure*. Kandungan karbon dari SA 36 kisaran 0,25% - 0,29%. Nilai dari uji tarik dijelaskan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.1 Komposisi Kimia ASTM A36

Elemen	Besaran kandungan (%)
C	0,25- 0,290
Cu	0,20
Fe	98,0
Mn	1,03
P	0,040
Si	0,280
S	0,050

Tabel 2.2 Nilai Mekanik ASTM A36

Nilai Mekanik	Satuan metrik
Kekuatan tarik maksimum	400-500 MPa
Kekuatan tarik <i>yield</i>	250 MPa
Elongasi	20% - 23%
Modulus elastisitas	200 GPa
<i>Bulk modulus</i>	140 GPa
<i>Poissons ratio</i>	0,260
Modulus geser	79,3 GPa

Densitas	7,85 g/cm ³
----------	------------------------

2.4 Sifat Mampu Las (*Weldability*)

Konsep yang berguna untuk digunakan dalam memahami kerentanan material baja karbon dan baja paduan rendah terhadap *hydrogen induced cracking* adalah *carbon equivalent*. Menurut Yurioka (1993) dalam buku ASM handbook vol 6, telah mengembangkan formulasi persamaan dari *carbon equivalent* menjadi :

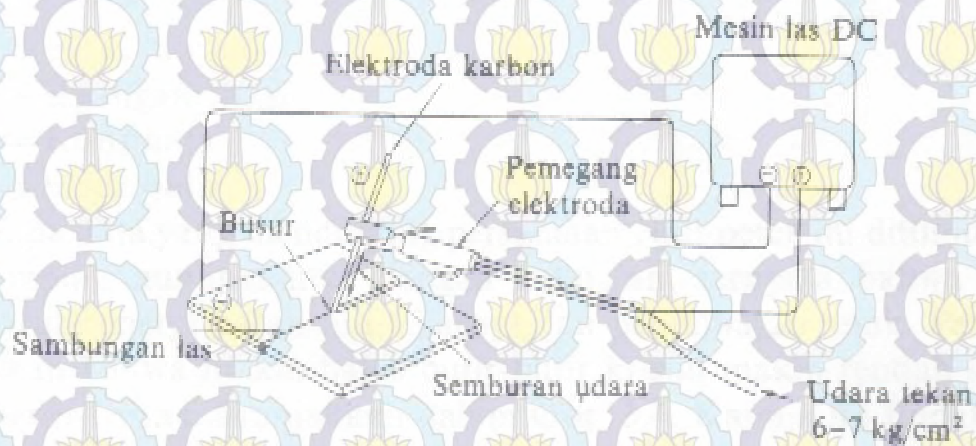
$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{3.6} + \frac{\%Cu}{20} + \frac{\%Ni}{9} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Mo}{4} \quad (2.1)$$

Dari pandangan metalurgi, *carbon equivalent* bisa dihubungkan dengan pengembangan dari sensitivitas struktur mikro terhadap hidrogen. Ketika nilai *carbon equivalent* tinggi, struktur mikro yang berkembang ketika fase pendinginan lebih rentan terhadap *hydrogen induced cracking*. Pada nilai *carbon equivalent* tinggi, struktur mikro martensit bisa diduga.

Apabila nilai *carbon equivalent* melebihi 0.35 %, *preheat* direkomendasikan untuk meminimalisir kerentanan terjadinya *hidrogen cracking*. Pada nilai *carbon equivalent* yang tinggi, baik *preheat* dan *postheat* mungkin diperlukan. Penggunaan dari *preheat* dan *postheat* untuk meminimalisir kerentanan terhadap *hydrogen induced cracking* adalah sesuatu hal yang bisa dilaksanakan didalam prosedur pengelasan berbagai material. Tetapi tentu saja, pada aplikasinya ada batasan pada temperatur yang akan diaplikasikan. Terlalu tingginya temperatur pada material bisa membuat pelaksanaan proses pengelasan menjadi sulit, khususnya pada pengelasan manual. Tingginya temperatur *preheat* akan menyebabkan pertumbuhan ukuran butiran yang berlebihan pada struktur HAZ, yang mana akan menurunkan nilai *fracture toughness* pada material tersebut. Temperatur *preheat* diatas 166 °C (300 °F) adalah hal yang tidak umum untuk diaplikasikan pada baja paduan rendah.

2.5 Arc Gouging (Pemotongan Busur Udara)

Pemotongan busur udara yang merupakan salah satu teknik *thermal gouging* adalah cara pemotongan logam dimana logam yang dipotong dicairkan dengan menggunakan busur listrik yang dihasilkan oleh elektroda karbon dan kemudian cairan logam disembur dengan udara tekan (Suratman, 1995). Umumnya *oxyfuel gas* dan *arc* proses dapat digunakan untuk mencairkan ulang dan menghilangkan logam hasil lasan yang tidak diinginkan. Akan tetapi, untuk mendapatkan bentuk *groove*, kedalaman dan ketebalan, *welder* harus terlatih dalam melakukan proses *gouging*, jika tidak terpenuhi maka akan menghasilkan *groove* yang buruk.



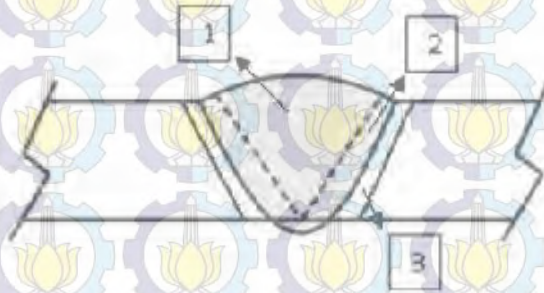
Gambar 2.1 Pemotongan busur udara (Suratman, 1995)

Proses *gouging* banyak digunakan dalam dunia manufaktur. Aplikasinya antara lain untuk menghilangkan bekas *tack welding*, *temporary welding* dan hasil pengelasan yang kurang sempurna. Ada dua cara pelaksanaan *gauging* yang lazim digunakan yakni *groove gauging* dan *spot gauging* untuk membersihkan cacat-cacat las.

2.6 Metalurgi Pengelasan

Suratman (2007) menyatakan bahwa proses pengelasan pada hakekatnya adalah proses penyambungan yang memanfaatkan fenomena metalurgi. Karena itu, permasalahan yang muncul di daerah sambungan adalah sebagai akibat dari fenomena tersebut. Permasalahan yang muncul dari fenomena metalurgi pada saat

mengelas baja adalah timbulnya martensit yang keras dan getas. Proses pengelasan yang melibatkan adanya pencairan di daerah sambungan, secara metalurgis akan menghasilkan tiga daerah seperti terlihat pada Gambar 2.2. berikut :



Gambar 2.2 Skema metalurgi sambungan pengelasan (Winarto, 2008)

Ketiga daerah tersebut (Gambar 2.2) adalah daerah logam las (daerah 1), daerah fusi atau daerah pencampuran antara logam las dengan logam induk (daerah 2) dan daerah *base metal* yang terpengaruhi panas (daerah 3).

Pada daerah logam las (daerah 1) : terjadi proses pembekuan dari logam las (*weld metal*) atau logam pengisi (*filler metal*). Fenomena pembekuan akan memunculkan struktur dendritik yang kasar diiringi dengan timbulnya segregasi sebagai akibat adanya laju pendinginan yang relatif cepat. Adanya pengkasaran ukuran butir dan *segregasi* di daerah logam las akan menurunkan sifat mekanik. Penurunan sifat mekanik yang terjadi jangan sampai melampaui sifat mekanik logam induk. Karena itu berdasarkan hal tersebut dan mengingat menurut standar bagian logam las tidak diperkenankan untuk gagal, maka untuk mengkompensasi penurunan tersebut dipilih kualitas mekanik logam las minimal 15% lebih tinggi dari sifat logam induk.

Disamping itu pada saat logam las membeku (bertransformasi fasa) senantiasa diiringi dengan perubahan volume (dalam hal ini menyusut). Perubahan volume yang mengiringi transformasi fasa merupakan cikal bakal timbulnya distorsi pada sambungan las bahkan menjadi cikal bakal timbulnya retak (*crack*) baik retak yang timbul dengan segera maupun retak yang timbul berikutnya (*delay crack*) baik di logam las (1) maupun di daerah yang dipengaruhi panas (3).

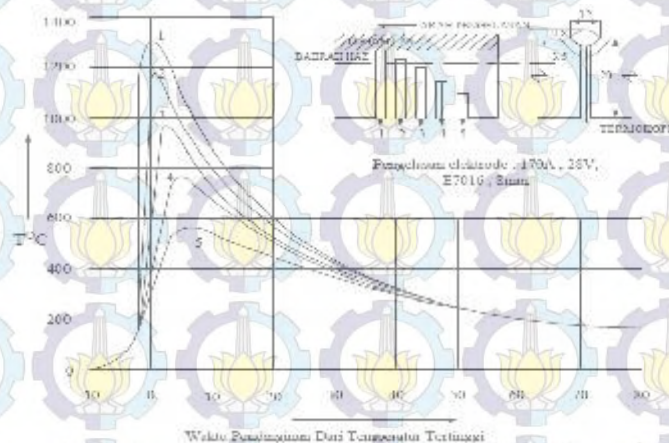
Pada daerah 2 (daerah fusi, yang kadang-kadang disebut juga sebagai dilusi) : Terjadi pencampuran antara logam las dan logam induk. Pada prinsipnya di daerah ini terjadi proses pemaduan. Secara umum hasil dari suatu proses pemaduan dapat menghasilkan larutan padat, senyawa atau campuran antara larutan padat dan senyawa yang akan memberikan perbedaan terhadap sifat mekanik yang dimilikinya. Dalam praktek, keberadaan senyawa intermetalik yang getas sangat tidak diinginkan apabila terbentuk di batas butir. Namun akan berperan sangat penting dalam meningkatkan kekuatan logam apabila senyawa tersebut muncul sebagai bagian dari fasa eutektik atau tersebar merata dalam bentuk partikel halus.

Pada daerah 3 (daerah yang dipengaruhi panas) : Akan terjadi kombinasi antara pembentukan butir-butir yang kasar sebagai akibat terekpos pada suhu tinggi dengan timbulnya transformasi fasa, dari fasa padat ke fasa padat yang lain. Menurut Hall-Petch, pengkasaran butir akan menyebabkan kekuatan logam menurun sedangkan transformasi fasa yang terjadi di daerah tersebut juga akan diiringi dengan perubahan volume. fenomena metalurgi yang terjadi di daerah 3 menjadi sangat kompleks dengan adanya temperatur gradient. Secara umum di daerah ini terjadi proses perlakuan panas dengan segala macam aspek yang mempengaruhinya seperti tinggi dan lamanya temperatur pemanasan, laju pendinginan, termasuk ada atau tidaknya *preheat* dan *postheat* dan jenis fasa yang akan dihasilkannya. Perlu digarisbawahi bahwa ketiga daerah tersebut akan selalu muncul pada saat menerapkan proses pengelasan yang melibatkan adanya proses pencairan, baik pada saat mengelas logam yang sama (*similar metal welding*) maupun pada saat mengelas dua logam yang berbeda (*dissimilar metal welding*).

2.7 Siklus Termal dan Distribusi Temperatur Logam Hasil Lasan

Pengelasan merupakan proses penyambungan antara dua bagian logam atau lebih dengan menggunakan energy panas. Karena proses ini maka daerah sekitar lasan mengalami siklus termal cepat yang menyebabkan terjadinya perubahan – perubahan metalurgi yang rumit, deformasi dan tegangan-tegangan termal. Pada umumnya struktur mikro baja bergantung pada kecepatan pendinginan dari suhu

daerah austenite sampai suhu kamar. Dengan adanya perubahan struktur maka sifat mekanik yang dimiliki berubah. Daerah lasan dibagi menjadi tiga bagian yaitu logam las, daerah pengaruh panas atau HAZ dan logam induk. Logam las adalah bagian dari logam dasar yang mencair pada waktu pengelasan dan kemudian membeku. Daerah HAZ adalah logam dasar yang bersebelahan dengan logam las yang selama proses pengelasan mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan cepat. Sedangkan logam induk adalah logam dasar dimana panas dan suhu pengelasan tidak menyebabkan terjadinya perubahan-perubahan sifat dan struktur. Siklus termal adalah proses pemanasan dan pendinginan di daerah lasan. Lamanya pendinginan dalam suatu daerah temperatur tertentu dari suatu siklus termal las sangat mempengaruhi kualitas sambungan. Karena itu banyak sekali usaha-usaha pendekatan untuk menentukan lamanya waktu pendinginan tersebut. Contoh siklus termal pada daerah las dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.3 Siklus termal daerah las dari batas las (Winarto, 2008)

Siklus termal las menunjukkan tempat kedudukan puncak tertinggi. Dalam hal ini menggambarkan kecepatan kenaikan temperatur pada proses las dan lama proses pendinginan. Serta dapat menunjukkan daerah pada lasan dimana kedudukan temperatur tertinggi. Selain itu secara terperinci siklus termal dapat menginformasikan proses pemanasan dan pendinginan di daerah lasan.

1. Temperatur puncak semakin turun dengan bertambahnya jarak pengukuran dari pusat lasan
2. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai temperatur puncak semakin lama dengan semakin jauhnya jarak dari pusat lasan
3. Laju pemanasan dan pendinginan semakin lambat dengan bertambahnya jarak dari pusat lasan
4. Siklus termal dipengaruhi oleh input panas karena menunjukkan temperatur puncak laju pendinginan dan waktu pendinginan. Selain itu siklus termal juga dipengaruhi oleh jenis material, tebal, dan jenis elektrode.

2.8 Struktur Mikro Daerah Pengaruh Panas / HAZ

Struktur, kekerasan dan berlangsungnya transformasi dari daerah HAZ dapat dibaca dengan segera pada diagram transformasi pendinginan berlanjut atau diagram CCT. Diagram semacam ini dapat digunakan untuk membahas pengaruh struktur terhadap retak las, keuletan dan sebagainya, yang kemudian dapat dipakai untuk menentukan prosedur dan cara pengelasan.



Gambar 2.4 Diagram distribusi temperatur (www.asme.org)

2.9 Pengelasan

Pengertian pengelasan menurut AWS (*American Welding Society*) adalah penyambungan 2 logam secara permanen dengan menggunakan panas dengan atau tanpa menggunakan tekanan serta menggunakan atau tidak bahan tambahan (*filler metal*). Pengelasan menurut AWS dapat dibedakan menjadi beberapa macam berdasarkan sumbernya antara lain :

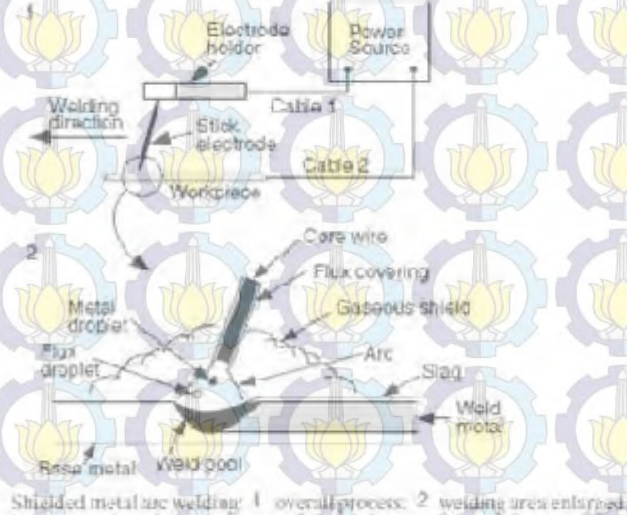
1. *Gas Welding (Oxy Acetylin, Oxy Hydrogen)*
2. *Arc Welding (Carbon Arc, Metal Arc, Submerged Arc, Inert Gas Welding, Plasma Arc, Electro Slag).*
3. *Resistance Welding (Spot, Seam, Projection, Butt., Induction).*
4. *Solid State Welding (Friction, Ultrasonic, Explosive, Forge and Diffusion).*
5. *Thermo-chemical Welding (Thermit, Atomic H₂).*
6. *Radiant Energy Welding (Electron Beam, Laser Beam).*

2.10 Proses Las SMAW

Proses pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) yang umumnya disebut Las Listrik adalah proses pengelasan yang menggunakan panas untuk mencairkan material dasar dan elektroda. Panas tersebut ditimbulkan oleh lonjakan ion listrik yang terjadi antara katoda dan anoda (ujung elektroda dan permukaan plat yang akan dilas). Panas yang timbul dari lonjakan ion listrik ini besarnya dapat mencapai 4000°C sampai 4500°C. Sumber tegangan yang digunakan ada dua macam yaitu listrik AC (Arus bolak balik) dan listrik DC (Arus searah).

Proses terjadinya pengelasan karena adanya kontak antara ujung elektroda dan material dasar sehingga terjadi hubungan pendek dan saat terjadi hubungan pendek tersebut, tukang las (*welder*) harus menarik elektrode sehingga terbentuk busur listrik yaitu lonjakan ion yang menimbulkan panas. Panas akan mencairkan elektrode dan material dasar sehingga cairan elektrode dan cairan material dasar akan menyatu membentuk logam lasan (*weld metal*). Untuk menghasilkan busur yang baik dan konstan, tukang las harus menjaga jarak ujung elektroda dan permukaan material dasar tetap sama. Adapun jarak

yang paling baik adalah sama dengan diameter elektroda yang dipakai, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 sebagai berikut,



Gambar 2.5 Proses las SMAW (www.metalscience.com)

Adapun besarnya panas/temperatur (H) yang dapat melelehkan sebagian bahan merupakan perkalian antara tegangan listrik (E) dengan kuat arus (I) dan waktu (t) yang dinyatakan dalam satuan panas joule seperti rumus dibawah ini :

$$H = E \times I \times t \dots \dots \dots (2.2)$$

dengan :

H = panas (joule)

E = tegangan listrik (volt)

I = kuat arus (amper)

t = waktu (detik)

2.11 Elektroda E 7016

Pengelasan dengan E 7016 mudah dikendalikan serta bentuk kampuh las baik, walaupun dengan arus las tinggi. Hasil pengelasannya mempunyai rigi-rigi las yang cembung (*convex*) dan percikan (*spatter*) yang sedikit. Dalam pengelasan kampuh-kampuh yang curam dan bentuk yang tidak beraturan, pemakaian kawat las ini memberikan hasil yang baik. Kawat las ini dapat

dipakai dengan baik pada baja paduan rendah (*Low Alloy Steel*), terutama pada bahan yang mengandung zat arang (*Carbon*) yang lebih tinggi. (Giachino, 1976)

Terak (*slag*) yang terjadi setelah proses las cukup tebal dan dapat dengan mudah dibersihkan, terak ini mengandung sedikit serbuk besi (*Iron powder slag*) dan dapat menutup dengan baik pada lasan. (Giachino, 1976)

Tabel 2.3 Komposisi kimia E7016

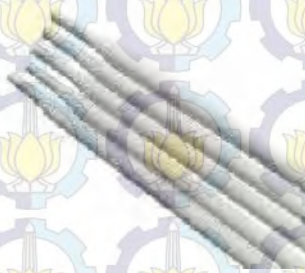
Elemen	Besaran kandungan (%)
C	0,08
Si	0,60
Mn	,0
P	0,011
S	0,006

(sumber : FAMILI ARC Kobe Steel)

Penjelasan standarisasi dari E -7016 adalah sebagai berikut: (AWS, 2004)

- E = elektroda las berlapis
- 70 = kekuatan tarik minimumnya sebesar 70.000 Psi
- 1 = untuk posisi pengelasannya (segala posisi)
- 6 = menunjukkan kawat las ini dapat dipakai pada arus bolak-balik (AC) atau arus searah (DC), dengan kadar hidrogen rendah dan mengandung serbuk besi (*Iron powder*)

Bahan fluks yang dipakai adalah *rutile* dengan kandungan Hidrogen rendah (*Low Hydrogen*) dan juga mengandung serbuk besi (*Iron powder*), selain itu ditambah dengan unsur-unsur lain seperti *Carbon*, *Silicon*, *Ferro manganese*, *Fhosforus* dan *Belerang*. Karena elemen campuran *flux* kawat las ini tidak banyak, maka kawat las ini memberikan keuntungan yaitu tidak adanya retak pada lasan atau pada daerah pengaruh panas (*HAZ/Heat Affective Zone*). (Giachino, 1976).



Gambar 2.6 Elektroda las E 7016 (www.indiamart.com)

2.12 Fungsi Dari Fluks Elektroda Pada Las SMAW

Fluks yang membungkus kawat elektroda berisi dari berbagai unsur larutan kimia dan bubuk metal yang digunakan supaya memiliki berbagai fungsi yang dijelaskan dibawah ini.




1. *Perlindungan*. Hal ini membuktikan bahwa gas pelindung yang dihasilkan busur las berfungsi sebagai pelindung *weld metal* dari udara. Untuk elektroda bertipe *cellulose*, selubung yang berisi *cellulose* ($C_6H_{10}O_5$). Sebagian besar campuran gas H_2 , CO , H_2O dan CO_2 dihasilkan ketika *cellulose* pada selubung elektroda dipanasi dan mengurai. Elektroda tipe *limestone* ($CaCO_3$) dengan kata lain, gas CO_2 dan slag CaO terbentuk ketika *limestone* terurai oleh panas. Elektroda tipe *limestone* adalah hidrogen rendah. Karena elektroda ini menghasilkan gas pelindung yang hidrogen rendah, elektroda ini sering digunakan untuk pengelasan pada material yang memiliki masalah dengan hidrogen *cracking*, seperti pada material *high strength steels*.
2. *Deoxidation*. Fluks elektroda membentuk slag ketika proses pengerasan *weld metal* yang berfungsi sebagai pelindung menghindari proses oksidasi.
3. *Arc Stabilization*. Berfungsi sebagai penstabil busur las. Busur las merupakan gas ion (plasma) yang mengalirkan arus listrik. Penstabil busur yang ikut mengurai pada busur las, seperti potassium *oxalate* dan *lithium carbonate*. Unsur-unsur tersebut meningkatkan *electrical*

conductivity busur las dan membantu busur las mengalirkan arus listrik lebih halus.

Metal tambahan. Selubung elektroda juga berfungsi sebagai elemen paduan atau bubuk metal pada logam las. Elemen paduan tersebut membantu mengontrol komposisi dari logam las dan meningkatkan *deposition rate*.

2.13 Persiapan Sisi

Bentuk-bentuk persiapan sisi bermacam-macam, diantaranya tergantung pada proses pengelasan dan tebal pelat yang akan dilas. Disamping itu, posisi pengelasan, *accessibility*, pertimbangan ekonomis, kemampuan pembuatan dan kekuatan sambungan dalam menerima beban juga menjadi faktor penentu pemilihan bentuk persiapan sisi. Dalam menentukan bentuk persiapan sisi yang tepat, selain dipergunakan perhitungan juga diperlukan pengalaman. Umumnya, persiapan sisi dikerjakan dengan tiga cara yaitu *shearing*, *thermal cutting* dan *machining*. *Shearing* merupakan cara yang ekonomis dalam memotong logam namun dibatasi oleh ketebalan material yang akan dipotong. Bentuknya berupa potongan lurus.

Jenis lasan	Lasan dengan alur		
	Lasan Penetrasi penuh tanpa pelat penahan	Lasan penetrasi penuh dengan pelat penahan	Lasan penetrasi sebagian
V tunggal (V)			

Gambar 2.7 Bentuk bevel single V-groove. (ASME IX, 2010)

Flame cutting merupakan cara yang paling banyak dipakai dalam membuat persiapan sisi karena selain bisa diperoleh bentuk lurus juga bisa dibuat bentuk *bevel* pada sisi pelat yang dipotong. *Root face* dibuat dengan cara ini. Cara ketiga, yaitu *machining* merupakan cara yang paling mahal. Cara ini umumnya dilakukan untuk membuat persiapan sisi bentuk U atau J. *Machining*

merupakan cara yang umum dipakai dalam membuat persiapan sisi pada sambungan *pipa/tube*.

2.14 Tegangan Sisa

Tegangan sisa adalah gaya elastik yang dapat mengubah jarak antar atom dalam bahan tanpa adanya beban dari luar. Tegangan sisa ditimbulkan karena adanya deformasi plastis yang tidak seragam dalam suatu bahan, antara lain akibat perlakuan panas yang tidak merata atau perbedaan laju pendinginan pada bahan yang mengalami proses pengelasan seperti yang terlihat pada Gambar. Walaupun tegangan sisa secara visual tidak nampak, namun sesungguhnya tegangan sisa tersebut juga bertindak sebagai beban yang tetap yang akan menambah nilai beban kerja yang diberikan dari luar.



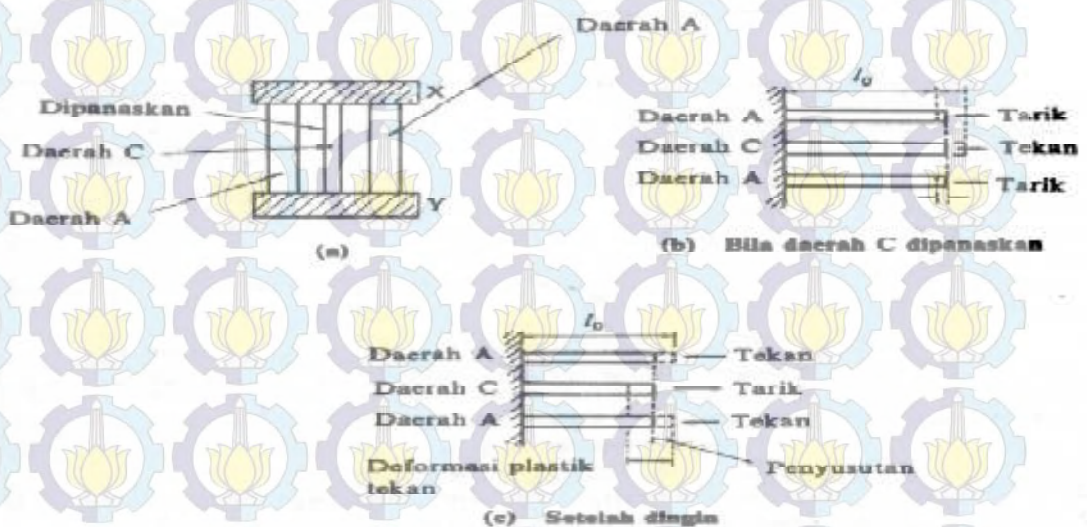
Gambar 2.8 Tegangan sisa akibat proses pengelasan
(Harsono W dan Toshie O, 2004)

2.14.1 Terjadinya Tegangan Sisa

Tegangan sisa selalu muncul apabila sebuah material dikenai perubahan temperatur *non-uniform*, tegangan-tegangan ini disebut tegangan panas. Untuk membahas masalah pengelasan, tegangan sisa yang akan ditinjau adalah tegangan sisa yang ditimbulkan dari distribusi regangan *non-elastic* yang tidak merata pada material.

Terjadinya tegangan sisa ditunjukkan pada Gambar 2.9 dibawah ini, dimana daerah C mengembang pada waktu pengelasan. Pengembangan pada daerah C ditahan oleh daerah A, sehingga pada daerah C terjadi tegangan tekan

dan pada daerah A terjadi tegangan tarik. Tetapi bila luas pada daerah A jauh lebih besar dari daerah C, maka daerah C akan terjadi perubahan bentuk tetap (distorsi), sedangkan pada daerah A terjadi perubahan bentuk elastis. Ketika proses pengelasan selesai, terjadi proses pendinginan dimana daerah C menyusut cukup besar karena disamping pendinginan juga karena tegangan tekan. Penyusutan ini ditahan oleh daerah A, oleh sebab itu daerah C akan terjadi tarik yang diimbangi oleh tegangan tekan pada daerah A.



Gambar 2.9 Skema terjadinya tegangan sisa
(Harsono W dan Toshie O, 2004)

2.14.2 Penyebab terjadinya tegangan sisa

Adapun beberapa penyebab terjadinya tegangan sisa diantaranya adalah :

- ❖ Tegangan sisa sebagai akibat dari tegangan termal seperti pada pengelasan dan perlakuan panas.
- ❖ Tegangan sisa yang disebabkan karena transformasi fasa (seperti baja karbon).
- ❖ Tegangan sisa karena deformasi plastis yang tidak merata yang disebabkan gaya-gaya mekanis seperti pada pengerjaan dingin selama pengerolan, penempaan, pembentukan logam atau pekerjaan lain yang dilakukan dengan mesin.

2.14.3 Sifat-sifat tegangan sisa

Adapun dibawah ini beberapa sifat dari tegangan sisa diantaranya adalah :

- Tegangan sisa sangat tinggi biasanya terjadi didaerah las dan daerah HAZ.
- Tegangan sisa maksimum biasanya sampai tegangan luluh (*yield stress*).
- Pada bahan yang mengalami transformasi fasa misalkan baja karbon rendah, tegangan sisa mungkin bervariasi pada permukaan dan bagian dalam dari logam induk

2.14.4 Pengaruh tegangan sisa

Adapun beberapa pengaruh akibat terjadinya tegangan sisa diantaranya adalah :

- Tegangan sisa yang disebabkan oleh proses pengelasan dapat mempengaruhi sifat-sifat mekanis struktur las seperti patah getas, kelelahan, dan retak karena kombinasi tegangan dan korosi.
- Pengaruh tegangan sisa menurun jika tegangan yang bekerja pada bahan meningkat.
- Pengaruh tegangan sisa pada struktur las bisa diabaikan jika tegangan yang bekerja pada struktur tersebut melebihi tegangan luluhnya.
- Pengaruh tegangan sisa menurun setelah pembebanan berulang.

2.15 Pengukuran Tegangan Sisa

Untuk menghitung tegangan sisa dapat dilakukan dengan menggunakan teknik pengukuran destruktif dan non-destruktif. Beberapa metode pengukuran tegangan sisa dengan menggunakan metode destruktif, yaitu:

1. Metode pengeboran (*Hole-drilling technique*)

Strain gauge disusun dengan posisi sudut 0° , 45° dan 90° , kemudian dibuat lubang ditengahnya. Adanya regangan saat pengeboran akan terukur oleh *strain gauge*. Regangan ini berasal dari pembebasan tegangan sisa.

2. Metode ring (*Core technique*)

3. Metode *bending* (*Deflection*)
4. Metode pemotongan (*Sectioning Technique*)

Tegangan sisa diukur dengan menggunakan *strain gauge* yang bekerja berdasarkan perubahan tahanan listrik.

Teknik non-destruktif merupakan pengukuran yang dilakukan tanpa merusak sampel. Teknik ini memberikan hasil yang lebih akurat dari pada metode destruktif. Teknik yang paling umum digunakan untuk pengukuran non-destruktif, yaitu:

1. *Xray/ Neutron/ Synchrotron diffraction*

Prinsip kerja pengukuran sinar-X berdasarkan sifat tegangan sisa yang dapat mempengaruhi struktur Kristal. Jika sinar-x mengenai bahan maka sebagian dari sinar tersebut mengalami difraksi dan membentuk pola-pola lingkaran yang bisa dilihat pada film.

2. *Ultrasonic technique* (UT)
3. *Magnetic methods*

Teknik difraksi didasarkan pada penggunaan kisi jarak sebagai *strain gauge*. UT menggunakan variasi rambat gelombang ultrasonic dalam bahan-bahan dibawah aksi tegangan mekanik. Sedangkan metode magnetik bergantung pada interaksi antara magnetisasi dan regangan elastik dalam bahan ferro-magnetik.

2.16 Hukum Bragg dan Syarat Difraksi

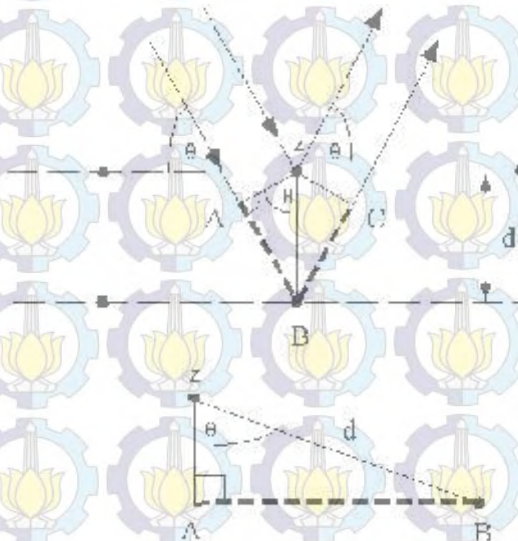
Pada sebuah material yang dikenakan sinar-x, atom-atom dapat mendifraksikan berkas tersebut, dalam hal ini ada 2 hal yang akan terjadi:

1. Hamburan sinar-x oleh setiap atom
2. Interferensi gelombang-gelombang terhambur

Gejala interferensi dan difraksi merupakan hal umum dibidang cahaya. Percobaan fisika dasar standar untuk menentukan jarak antar kisi dilakukan dengan mengukur sudut berkas difraksi dari cahaya yang diketahui panjang gelombangnya. Persyaratan yang harus dipenuhi:

1. kisi-kisi bersiat periodik

2. panjang gelombang cahaya mempunyai orde yang sama dengan jarak kisi-kisi yang akan ditentukan



Gambar 2.10 Hukum Bragg untuk difraksi sinar-x

(Basary, 2006)

Hukum Bragg menunjukkan bahwa difraksi ekuivalen dengan pemantulan simetris oleh berbagai bidang Kristal asalkan persyaratan tertentu dipenuhi. Berkas sinar-x dengan panjang gelombang (λ) yang jatuh dengan sudut θ pada set bidang Kristal dengan jarak d . Berkas yang dipantulkan dengan sudut θ bersifat riil, berkas dari bidang berikutnya saling memperkuat. Agar ini dipenuhi, jarak tambah yang harus ditempuh oleh berkas yang dipantulkan oleh tiap bidang berikutnya (atau selisih jarak) harus sama dengan bilangan bulat dikalikan panjang gelombang $n\lambda$. Sebagai contoh berkas kedua yang diperlihatkan pada Gambar 2.18 harus menempuh jarak yang lebih besar dari pada jarak yang ditempuh oleh berkas pertama, selisih jarak tersebut adalah $AB=BC$. Persyaratan pemantulan akan saling memperkuat menjadi

$$n\lambda = \overline{AB} + \overline{BC} = 2\overline{AB} = d\sin\theta + d\sin\theta = 2d\sin\theta \dots (2.3)$$

$$\lambda = 2d_{hkl} \sin\theta_{hkl}; \overline{AB} = d\sin\theta \dots (2.4)$$

Persamaan ini adalah hukum Bragg dan nilai sudut kritis θ yang memenuhi hukum ini disebut hukum Bragg. Arah berkas yang dipantulkan semata-mata ditentukan oleh geometri kisi yang bergantung pada orientasi dan jarak bidang kristal. Kristal memiliki simetri kubik dengan ukuran struktur sel a , maka sudut difraksi berkas dari bidang kristal (hkl) dapat dihitung dengan mudah dari hubungan jarak interplanar

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \dots \dots \dots (2.5)$$

Telah menjadi kebiasaan untuk memasukkan orde refleksi n bersama dengan indeks Miller, dan apabila ini diterapkan maka hukum Bragg menjadi:

$$\lambda = 2a \sin \theta \sqrt{(n^2 h^2 + n^2 k^2 + n^2 l^2)} \dots \dots \dots (2.6)$$

$$\lambda = 2a \sin \theta \sqrt{n} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana:

- d : jarak kisi interplanar
- (h,k,l) : bidang Kristal
- a : ukuran struktur sel
- n : orde refleksi/pantulan/bilangan garis

2.17 Analisa Data Difraksi dan Tegangan Sisa dengan Metode Scherrer

Setelah semua data difraksi didapat maka akan dilakukan pencocokan model kurva terukur dengan kurva permodelan, untuk itu digunakan *software* seperti (*Profile search match Phillips x'pert*) dengan format SD, DAT dan *software Rietica* dengan format DAT, CPI.

1. Data difraksi langsung dianalisa untuk menentukan posisi puncak digunakan *Search and Match program* untuk menentukan fasa-fasa apa saja yang terkandung pada material hasil proses pengelasan.
2. Menggunakan *profile fitting* untuk mengetahui posisi puncak dan *FWHM*. Didapatkan data grafik puncak difraksi dan posisi puncak serta *FWHM*.

3. Data FWHM dari puncak tertinggi diubah dari derajat(^o) kedalam radian, lalu digunakan untuk mencari nilai B dengan mengurangkan dengan material standart Si. Rumus sebagai berikut:

$$B^2 = E_s^2 - B_{st}^2 \quad (2.8)$$

Dimana:

B : Selisih nilai FWHM (Radian)

B_s : Nilai FWHM puncak tertinggi sampel (Radian)

B_{st} : Nilai FWHM puncak tertinggi standard (Radian)

4. Setelah nilai B didapatkan, maka mencari nilai regangan (ε) dengan rumus sebagai berikut:

$$\epsilon = \frac{B}{4(\tan\theta)} \quad (2.9)$$

Dimana:

ε : regangan

B : selisih nilai FWHM (Radian)

θ : Posisi puncak tertinggi sampel (^o)

5. Setelah didapat nilai regangan, maka dicari nilai tegangan sisa dengan rumus berikut:

$$\sigma = E.\epsilon \quad (2.10)$$

Dimana:

σ : tegangan (MPa)

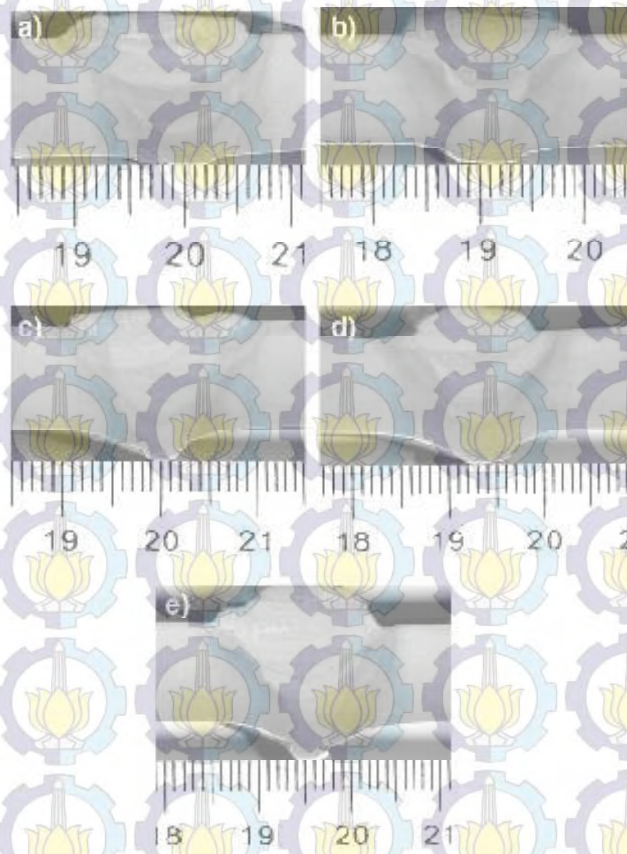
E : modulus young (Mpa)

ε : regangan (mm/mm)

2.18 Hasil Penelitian Sebelumnya

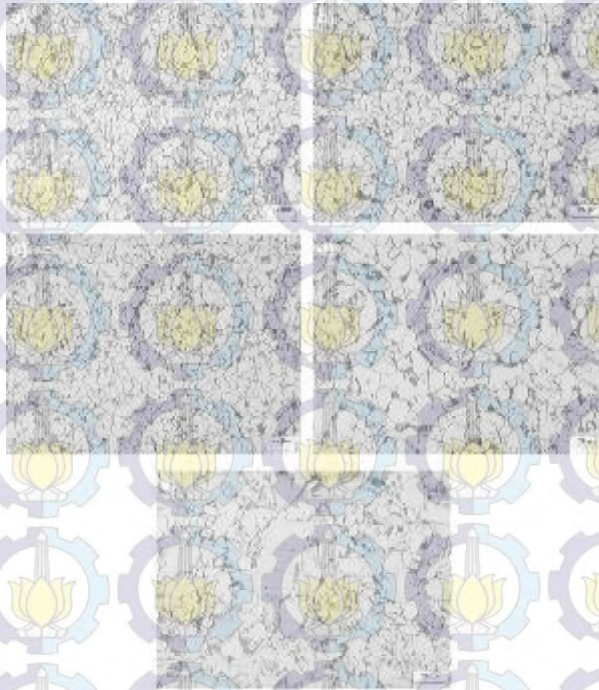
Berikut ini merupakan uraian singkat dari penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan pengelasan *multiple repair*. Vega et al (2008) melalui penelitiannya menghasilkan beberapa kesimpulan adapun ulasannya adalah sebagai berikut pengamatan melalui ukuran butir mengindikasikan bahwa pengelasan *repair* secara umum menghasilkan ukuran butir yang lebih besar pada daerah HAZ bila dibandingkan dengan yang tanpa *repair*, hal ini

menyebabkan menurunnya nilai ketangguhan pada daerah HAZ. Pembuktian terjadinya hal tersebut dibuktikan melalui Gambar 2.11 hasil makro etsa dan Gambar 2.12 mengenai struktur mikro.



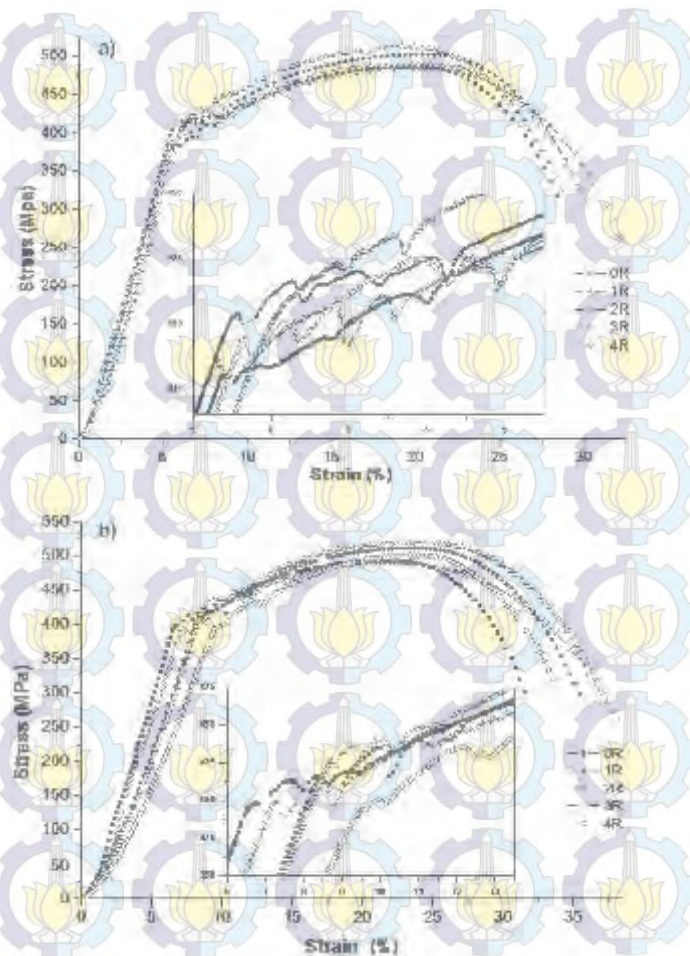
Gambar 2.11 Makroetsa hasil perbandingan (a) Tanpa *repair*, (b) *Repair 1x*, (c) *repair 2x*, (d) *Repair 3x*, (e) *Repair 4x*. (Vega et al, 2008)

Melaui tampilan makroetsa dapat terlihat jelas bahwa adanya perbedaan bila dibandingkan dengan pengelasan yang tanpa *repair* dan yang di *repair*, semakin banyaknya *repair* yang dilakukan maka semakin lebar pula area HAZ yang akan dihasilkan yang akan berakibat semakin membesarnya butiran pada daerah tersebut seperti tampak pada Gambar 2.12.



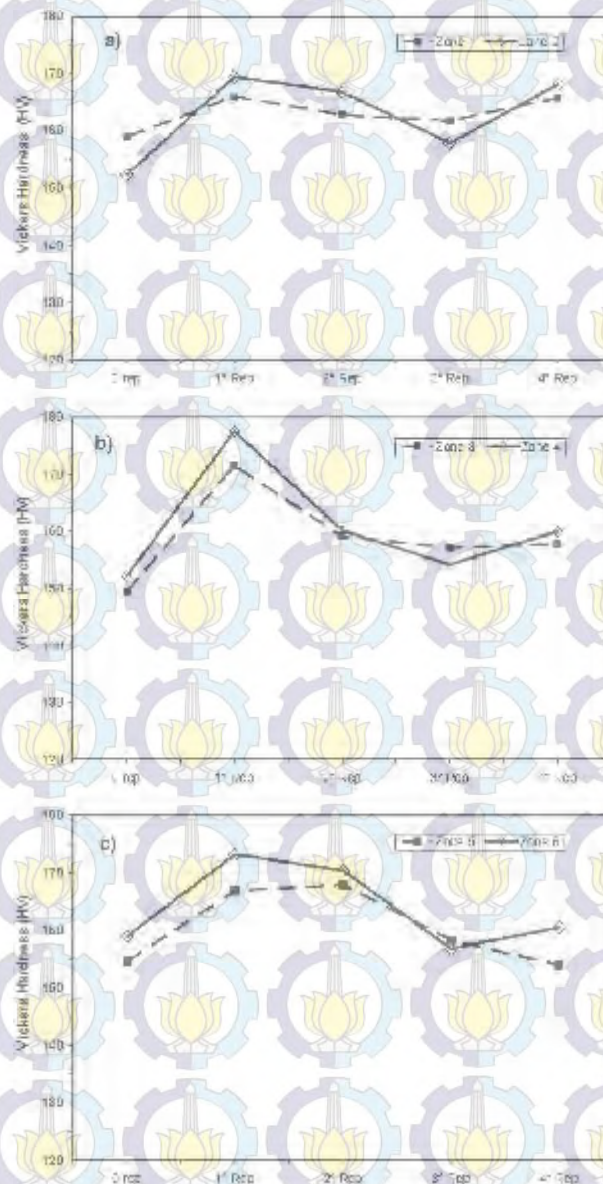
Gambar 2.12 Hasil perbandingan Struktur mikro Daerah HAZ (a) Tanpa *repair*, (b) *Repair 1x*, (c) *Repair 2x*, (d) *Repair 3x*, (e) *Repair 4x*. (Vega et al, 2008)

Struktur mikro pada daerah HAZ menghasilkan ferit poligonal dengan perlit pada batas butir sedangkan pada *base metal* menghasilkan *acicular ferrite* yang didefinisikan sebagai ferit yang tidak beraturan dan beberapa ukuran butir tidak terdistribusi secara merata dengan orientasi acak bersamaan dengan pertumbuhan austenite pada batas butir.



Gambar 2.13 Grafik uji tarik (Vega et al, 2008)

Melalui hasil uji tarik dapat diketahui bahwa pengelasan tanpa *repair* tidak mengalami patah mulur yang terlalu panjang, hal ini dikarenakan HAZ tidak terlalu banyak pertumbuhan butir bila dibandingkan dengan yang mengalami *repair* sehingga berakibat pada daerah austenite yang melebar dan secara langsung berakibat pada daerah keuletan yang ikut melebar pula.



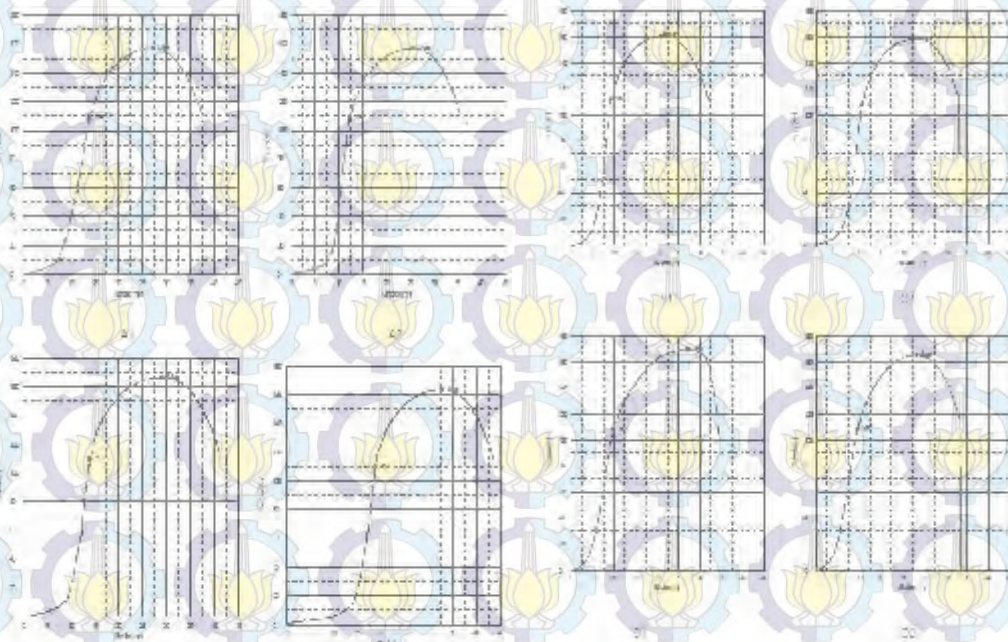
Gambar 2.14 Nilai uji kekerasan pada perbandingan HAZ (a) Tanpa *repair*, (b) *Repair* 1x, (c) *Repair* 2x, (d) *Repair* 3x, (e) *Repair* 4x. (Vega et al, 2008)

Hasil pengujian kekerasan pada juga menunjukkan bahwa semakin banyak *repair* maka kekerasan akan semakin menurun baik pada daerah atas dekat dengan permukaan maupun daeran *root pass*.

Sandi Pribadi (2012) melalui penelitiannya mengenai pengelasan *multiple repair* pada material SM 400 yang diaplikasikan pada *boogey* kereta api menghasilkan beberapa kesimpulan. Adapun ulasannya adalah sebagai berikut,

dalam pengujian tarik pada sambungan las menggunakan mesin SHIMADZU 600 kN, spesimen uji tarik dibuat sesuai standar JIS G 3106 : 2004. Dari hasil pengujian tarik didapat data sebagai berikut :

	Yield_Force	Yield_Stress	Max_Force	Max_Stress	Elongation
Units	kN	MPa	kN	MPa	%
A1	107.83	311.76	157.88	458.46	21.55
A2	108.22	309.62	157.89	450.28	20.58
B1	109.83	309.21	166.54	468.86	20.21
B2	109.89	307.78	164.05	459.47	21.90
C1	111.36	321.70	161.93	466.73	21.67
C2	107.46	304.27	159.02	450.24	20.36
D1	108.36	300.16	170.00	470.91	21.03
D2	108.88	295.39	165.90	450.08	20.12



Gambar 2.15 Grafik rekam data hasil pengujian tarik (Sandi, 2012)

Keterangan:

1. A = Tanpa Repair
- B = Repair 2x
- C = Repair 3x

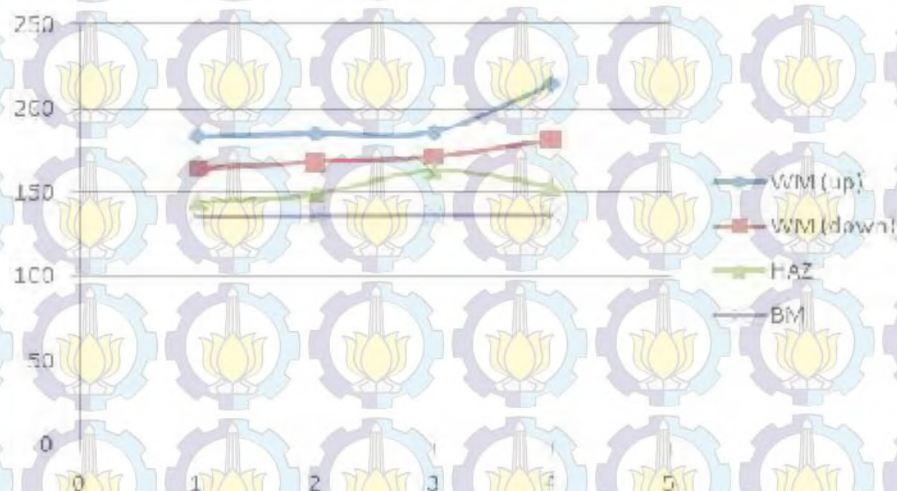
- D = Repair 4x
2. Patah pada *base metal*.

Dari data yang diperoleh diatas dapat disimpulkan bahwa:

- Seluruh material memenuhi persyaratan kekuatan tarik yang telah ditentukan oleh standar JIS G 3106 : 2004, yaitu antara 400 -510 MPa.
- Material *Tanpa Repair* memiliki rata-rata kekuatan tarik yang paling kecil
- Material *Repair 3X* memiliki rata-rata kekuatan *yield* yang paling besar.
- Material *repair 4X* memiliki rata-rata *elongation* yang paling kecil.

Dari hasil pengujian *hardness* yang telah dilakukan, didapatkan data sebagai berikut:

- *Material* : Plat SM 400 grade A
- *Load (P)* : 10 kgf
- *Time (s)* : 15



Gambar 2.16 Grafik *hardness* yang terjadi pada setiap daerah (Sandi, 2012)

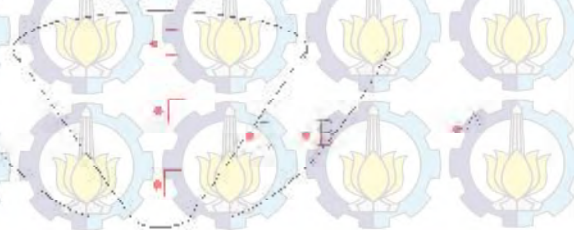
Keterangan:

- 1 = Tanpa Repair
- 2 = Repair 2x
- 3 = Repair 3x
- 4 = Repair 4x

Dari grafik yang diperoleh diatas dapat disimpulkan bahwa:

- Nilai kekerasan dari setiap daerah semakin besar dengan adanya proses pengelasan dan pengrepairan.
- Nilai kekerasan pada *weld metal* dan HAZ yang terkena repair semakin besar dengan semakin banyaknya proses repair.

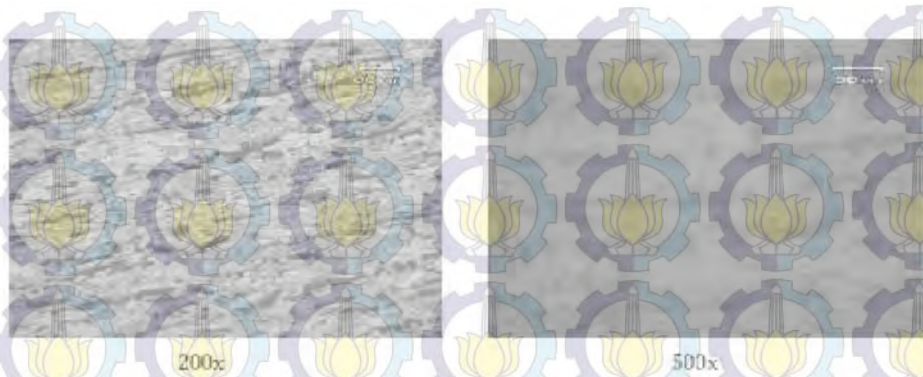
Pengujian struktur mikro dilakukan untuk melihat struktur mikro yang terbentuk akibat proses pengelasan. Masing-masing spesimen diambil foto struktur mikro dengan pembesaran bervariasi antara 100X, 200 X dan 500X. Struktur mikro yang diamati adalah pada daerah *base metal*, *HAZ*, *fusion line*, *weld metal* bagian atas, *weld metal* bagian tengah, dan *weld metal* bagian bawah.



Gambar 2.17 Skema pengujian struktur mikro (Sandi, 2012)

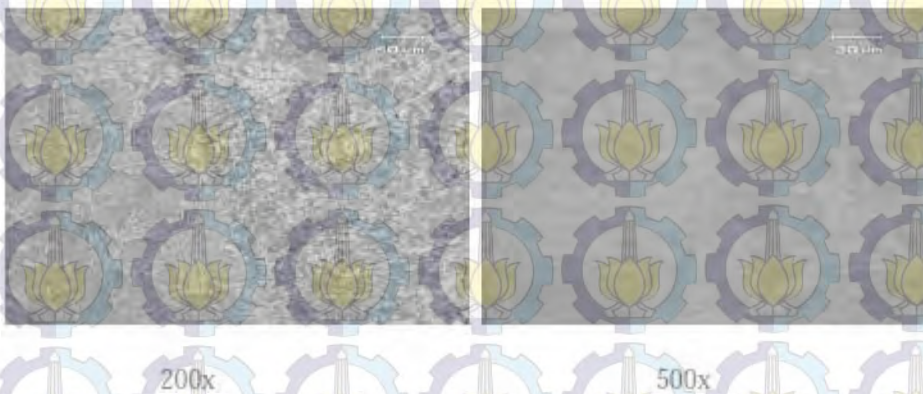
Keenam daerah tersebut mendapatkan perlakuan panas yang berbeda pada saat proses pengelasan berlangsung, sehingga dengan adanya perlakuan yang berbeda maka struktur mikro yang didapatkan berbeda pula.

Base metal pada keempat variabel memiliki struktur mikro yang sama (Gambar 2.18), Ferit (putih) dan perlit (hitam). Tampilan perlit yang memanjang meningkatkan sifat mekanik dari material. Dari semua proses pengelasan yang dilakukan *base metal* tidak mengalami perubahan karena paparan panas yang diterima *base metal* belum mencapai temperatur austenit.

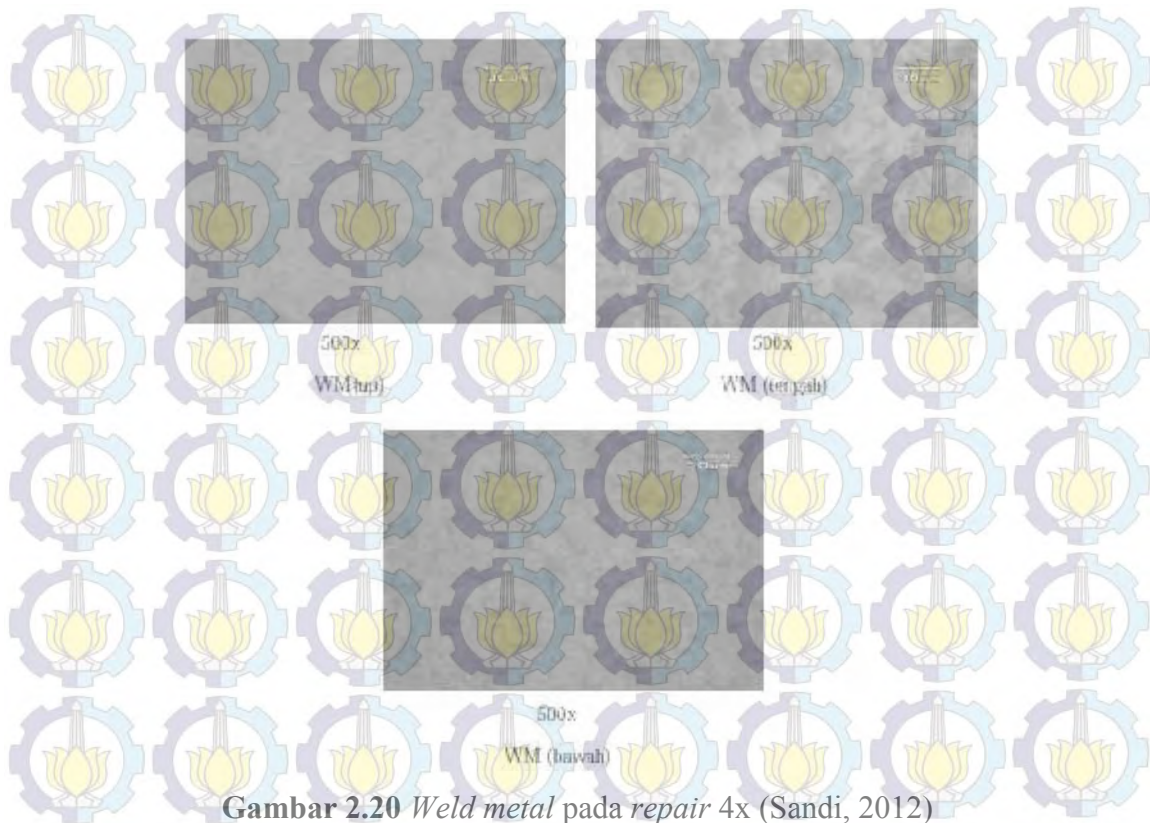


Gambar 2.18 *Base metal tanpa repair* (Sandi, 2012)

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.18 diatas, pada permukaan, proses peleburan pada batas butir *base metal* yang tiba-tiba menjadi *fusion line* menjadikan bentuk butirannya seperti kristal-kristal pasir selama proses pengelasan. Pola Pertumbuhan butiran yang terbentuk masih dipengaruhi dengan bentuk pola dari HAZ yang ada pada Gambar 2.19. Hal ini bisa terjadi karena dalam proses pengurangan *weld metal* dengan *gouging* dan *gerinda* yang dilakukan secara manual, daerah *fusion line* yang terbentuk dari proses pengelasan sebelumnya untuk material *repair* 2X, 3X dan 4X juga ikut dihilangkan.



Gambar 2.19 *Fusion line pada repair 4 X* (Sandi, 2012)



Gambar 2.20 *Weld metal pada repair 4x (Sandi, 2012)*

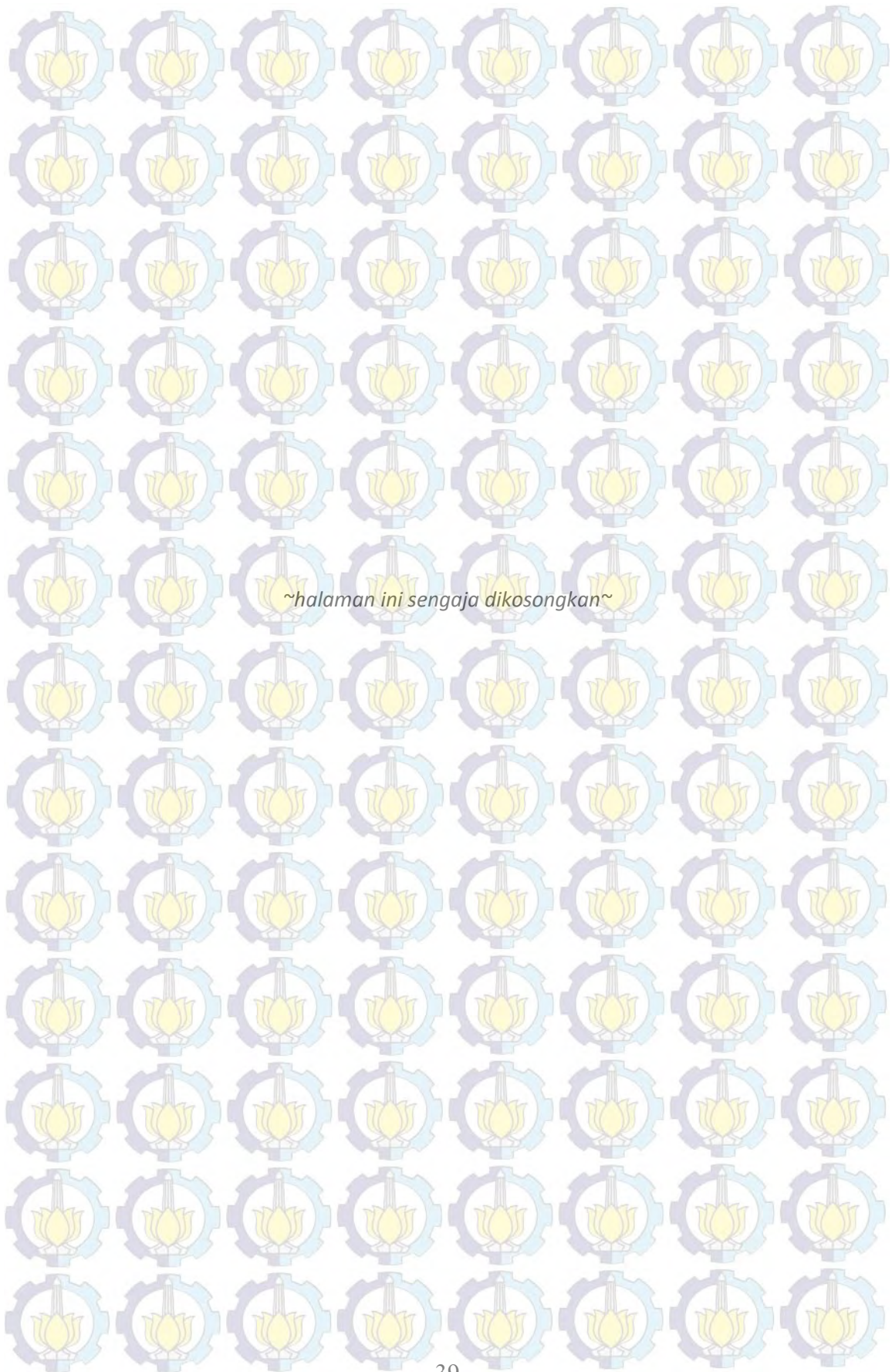
Sudah menjadi sifat dari proses pengelasan adalah formasi dari bentuk *weld metal* yang terbentuk. Bentuk dari *weld metal* ditentukan oleh aliran panas dan metal itu sendiri yang mana peleburan terjadi dari sumber panas dan solidifikasi terjadi dibelakangnya. *Heat input* juga mempengaruhi volume dari *weld metal* dan bentuk butiran yang terbentuk di *weld metal*. Pada permulaan proses peleburan pada batas butir *base metal* yang tiba-tiba menjadi *fusion line* menjadikan bentuk butirannya seperti kristal-kristal pasir selama proses pengelasan. Pertumbuhan butiran yang terus menerus akan menghasilkan bentuk butiran yang columnar yang besar yang mana bentuk tersebut menyebabkan mudahnya terbentuk indikasi retak. Tetapi *columnar growth* biasanya akan terhapus apabila proses pengelasan yang dilakukan adalah *multipass* yang mana antara pass yang satu dengan yang lain saling bertumpukan.

Disamping penguraian hasil penelitian diatas, setelah dilakukan studi literatur dibawah berikut ini didapat data dan pembahasan dari jurnal penelitian sebelumnya. Adapun pemaparan hasil referensi dari jurnal penelitian sebelumnya terdapat pada Tabel 2.4 dibawah ini.

Tabel 2.4 Hasil penelitian sebelumnya

No.	Nama Peneliti/Tahun	Variasi					Hasil
		Material	Proses Las/ampere	Elektroda	Metode repair	Jumlah repair	
1	MacGaughy et al/1990	API 5L X65	SMAW/ 60-100 A	E 8010-G	Carbon gouging	3 kali	Luas area HAZ meningkat berturut-turut mulai dari 0.5%, 18% dan 30% dengan diiringi semakin bertambahnya jumlah repair.
2	Vega et al / 2008	API X52	SMAW/ 60-90 A	E 6010 (root) & E7010 (filler)	Carbon gouging	4 kali	Terjadi pertumbuhan butir pada daerah HAZ yang berkontribusi terhadap menurunnya ketangguhan sambungan las.
3	Dipo Wirarchi / 2010	ASTM A106	SMAW/ 65-95 A	E7016 (root) & E7018 (filler)	Carbon gouging	3 kali	Nilai tarik 54.036-53.727 kgf/mm ² , Tidak terjadi penambahan presentase ferrite dan perlite yang sangat signifikan dan presentase ferrit dan perlite pada base metal hampir sama hal ini diakibatkan input panas yang diterima pada saat gouging dan pada saat pengelasan ulang sebanyak 3 kali.
4	Miftahul Ulum / 2011	ASTM A572	SMAW/ 65-95 A	E7018 (root & filler)	Carbon gouging	3 kali	Luas area HAZ meningkat berturut-turut mulai dari yang tanpa repair hingga yang di repair sebesar 0.05%, 15%

							dan 61 % serta seluruh patahan impact 100% ulet terkecuali untuk repair tiga kali yang berupa getas.
5	Sandi Pribadi / 2012	SM 400 Grade A	GMAW/ 240-300 A	ER 70 S-6	Carbon gouging	4 kali	Nilai uji tarik 450-470 MPa Lebar HAZ bertambah 0.5%, 1%, 1.5% dan 2%.



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Material Penelitian

Material yang akan digunakan adalah jenis material plat baja ASTM A36 dengan dimensi preparasi seperti yang terlihat pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2. Adapun data-data mengenai material ini dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2 dibawah berikut ini.

Tabel 3.1 Komposisi kimia ASTM A36

Elemen	Besaran kandungan (%)
C	0,25- 0,290
Cu	0,20
Fe	98,0
Mn	1,03
P	0,040
Si	0,280
S	0,050

(sumber :ASTM *International*)

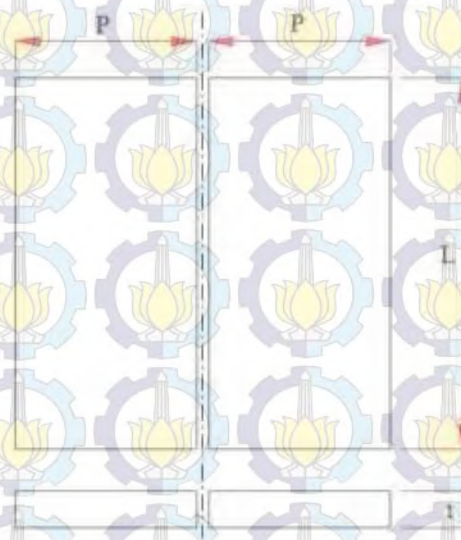
Tabel 3.2 Nilai mekanik ASTM A36

Nilai Mekanik	Satuan metrik
Kekuatan tarik maksimum	400-500 MPa
Kekuatan tarik <i>yield</i>	250 MPa
Elongasi	20% - 23%
Modulus elastisitas	200 GPa
<i>Bulk modulus</i>	140 GPa

Poissons ratio	0,260
Modulus geser	79,3 GPa
Densitas	7,85 g/cm ³

(sumber :ASTM International)

Pelat baja ASTM A36 dilakukan pemotongan hingga mencapai dimensi seperti tampak pada Gambar 3.1 dibawah ini.

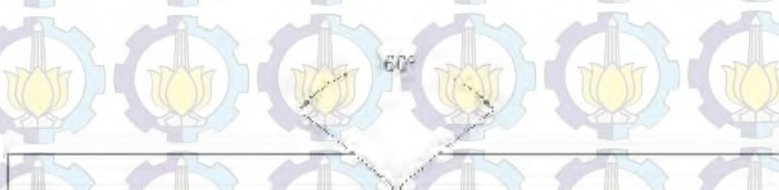


Gambar 3.1 Dimensi pelat

Keterangan :

- P = 150 mm
- L = 400 mm
- t = 9 mm

Setelah dilakukan pemotongan pelat kemudian dilakukan pembuatan kampuh las pada untuk daerah penyambungan dengan sudut sebesar 60° seperti tampak pada Gambar 3.2 dibawah ini.



Gambar 3.2 Kampuh las

3.2 Parameter Pengelasan

Adapun dokumen prosedur pengelasan mengacu pada *Welding Procedure Specification* (WPS) berdasarkan standar AWS D1.1 2004 tentang prosedur pengelasan material baja. Adapun spesifikasi prosedur dan parameter pengelasannya adalah sebagai berikut :

- *Welding Process : Shield Metal Arc Welding (SMAW)*
- *Type : Manual*
- *Joint Design : Butt Joint, Single 'V' Groove*
- *Base Metal : ASTM A36*
- *Groove : 1-3 mm*
- *Filler Metal :*
 - ❖ *AWS no. (Classification) : E 7016 root, filler & capping*
 - ❖ *Diameters : 2.6 mm dan 3.2 mm*
 - ❖ *Welding Position : 1 G (horisontal position)*
- *Interpass Temperature : -*
- *Current (AC or DC) : DC*
- *Polarity : - ve*
- *Amperage (Range) : 0 – 200 Ampere & Voltage (Range) : 20 - 50 V*
- *String or Weave Bead : Both*
- *Initial and Interpass Cleaning : Chipping, Brushing and Grinding*
- *Travel Of Speed : 20 - 150 mm/minute*

Logam pengisi yang digunakan dalam penelitian ini adalah E7016 yang memiliki kekuatan tarik minimum 70 ksi dan bisa digunakan untuk segala posisi serta sifat fluks (pelindung logam pengisi) bersifat *low hydrogen*, dimana sifatnya yang tidak mudah menyerap gas hidrogen sehingga diharapkan pada hasil produk *weld metal* tidak terdapat fusi gas yang terperangkap yang dapat menyebabkan cacat *porosity*. Adapun komposisi kimi dari E7016 ditampilkan pada Tabel 3.3 dibawah berikut ini.

Tabel 3.3 Komposisi kimia E7016

Elemen	Besaran kandungan (%)
C	0,08
Si	0,60
Mn	,0

P	0,011
S	0,006

(sumber : FAMILI ARC Kobe Steel)

3.3 Proses *Repair*

Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam proses *repair* adalah sebagai berikut :

1. Mempersiapkan mesin *gouging* (menggunakan mesin las SMAW)
2. Mempersiapkan *elektroda karbon*, bentuknya seperti tampak pada Gambar

3.3



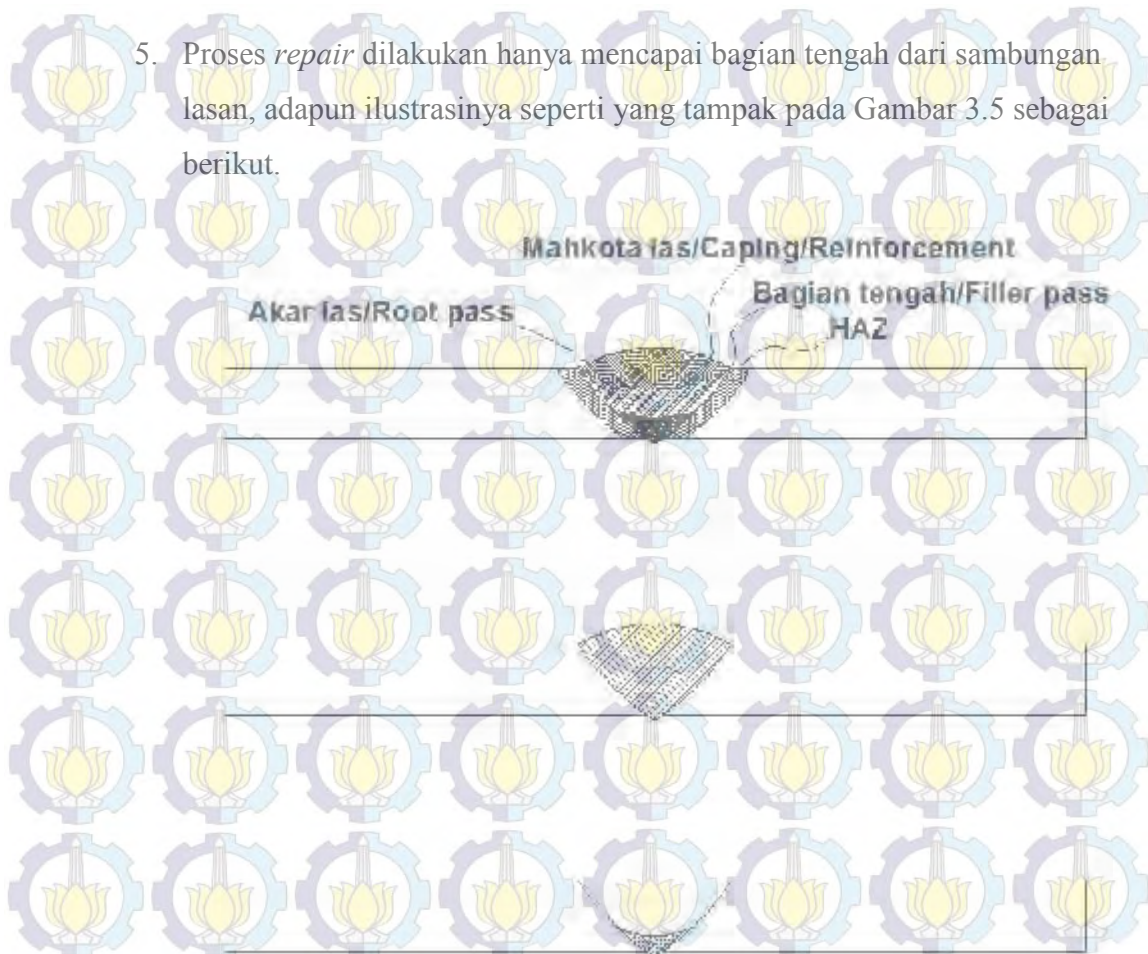
Gambar 3.3 Elektroda karbon *gouging* (www.indiamart.com)

3. Mempersiapkan spesimen ASTM A36 yang selesai dilas untuk dilakukan *repair*
4. Setelah persiapan selesai maka siap untuk melakukan *repair*. Adapun proses *repair* dapat dilihat pada Gambar 3.4 dibawah ini



Gambar 3.4 Proses *repair* menggunakan elektroda karbon *gouging*

5. Proses *repair* dilakukan hanya mencapai bagian tengah dari sambungan lasan, adapun ilustrasinya seperti yang tampak pada Gambar 3.5 sebagai berikut.

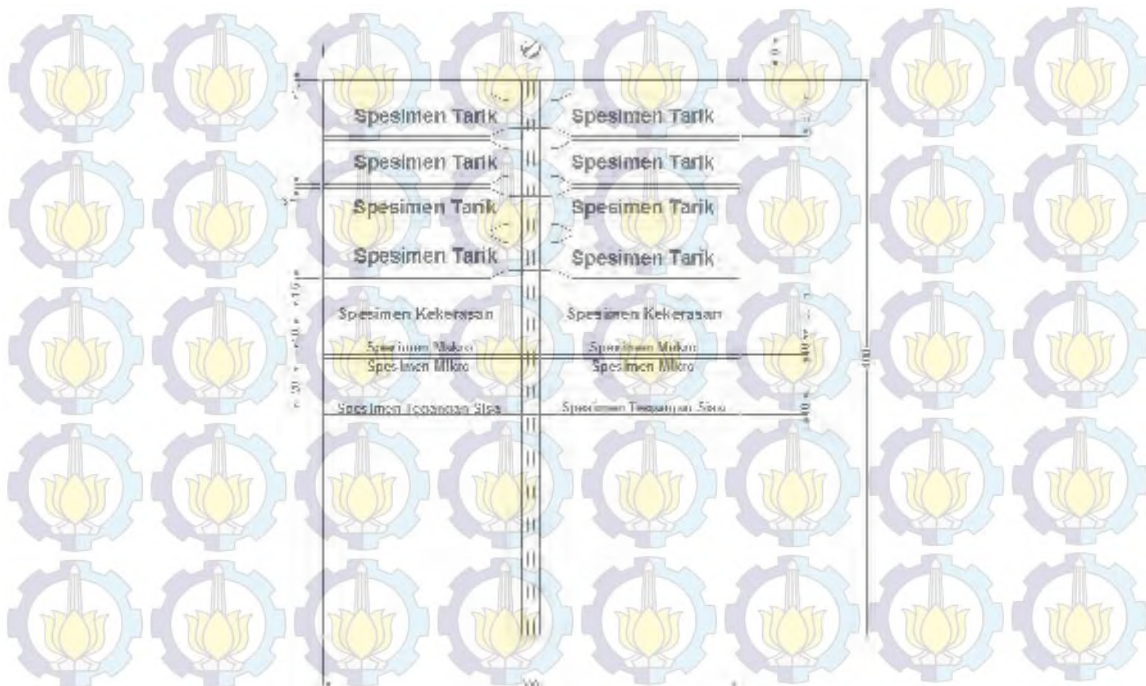


Gambar 3.5 Ilustrasi area sambungan yang harus di *repair*

6. Setelah proses *gouging* selesai maka spesimen harus diratakan dan dihaluskan dengan menggunakan gerinda.
7. Setelah semua proses selesai selanjutnya adalah pemotongan spesimen untuk pengujian.

3.4 Pengambilan Spesimen Uji

Sebelum dilakukan pengujian, material terlebih dahulu dipotong menjadi spesimen-spesimen uji sesuai dengan dimensi yang diperlukan. Adapun rancangan pengambilan pemotongan material dapat dilihat pada Gambar 3.6 di bawah berikut ini.



Gambar 3.6 Rancangan pengambilan spesimen

3.5 Pengujian Mekanik

Tahap pelaksanaan pengujian mekanik dilakukan untuk dapat mengetahui sifat mekanik dari sampel. Beberapa pengujian mekanik yang dilakukan antara lain sebagai berikut.

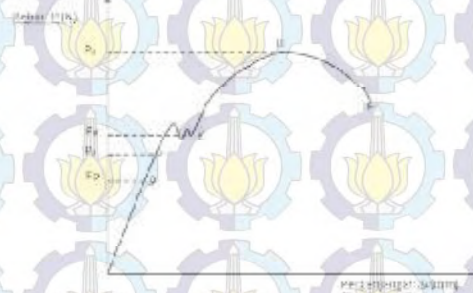
3.5.1 Pengujian tarik

Kekuatan tarik merupakan sifat mekanik logam yang penting. Terutama untuk perencanaan konstruksi maupun pengerjaan logam tersebut. Kekuatan tarik suatu bahan dapat diketahui dengan menguji tarik pada bahan yang bersangkutan. Dari hasil pengujian tarik tersebut dapat diketahui pula sifat-sifat yang lain, seperti: perpanjangan, reduksi penampang, dan sebagainya. Pada pengujian tarik, spesimen dikenai beban uji aksial yang semakin besar secara kontinyu. Langkah-langkah pengujian tarik dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Mencatat data mesin tarik.
2. Mengukur dimensi spesimen, tiap dimensi diukur tiga kali.
3. Memasang spesimen pada penjepit.
4. Mengatur skala pembebanan.

5. Memasang kertas grafik dan pena.
6. Memberikan pembebanan dengan kecepatan maksimum (P_{max}).
7. Selama penarikan, perhatikan perubahan yang terjadi pada spesimen maupun grafik.

Selama penarikan setiap saat dicatat dengan grafik yang tersedia pada mesin tarik, besarnya gaya tarik yang bekerja dan besarnya pertambahan panjang yang terjadi akibat gaya tarik tersebut. Data yang diperoleh dari mesin tarik biasanya dinyatakan dengan grafik *beban-pertambahan panjang* (grafik $P - \Delta L$) seperti yang tampak pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Grafik $P - \Delta L$ (ASTM, 2003)

Keterangan :

P : Titik batas proporsional

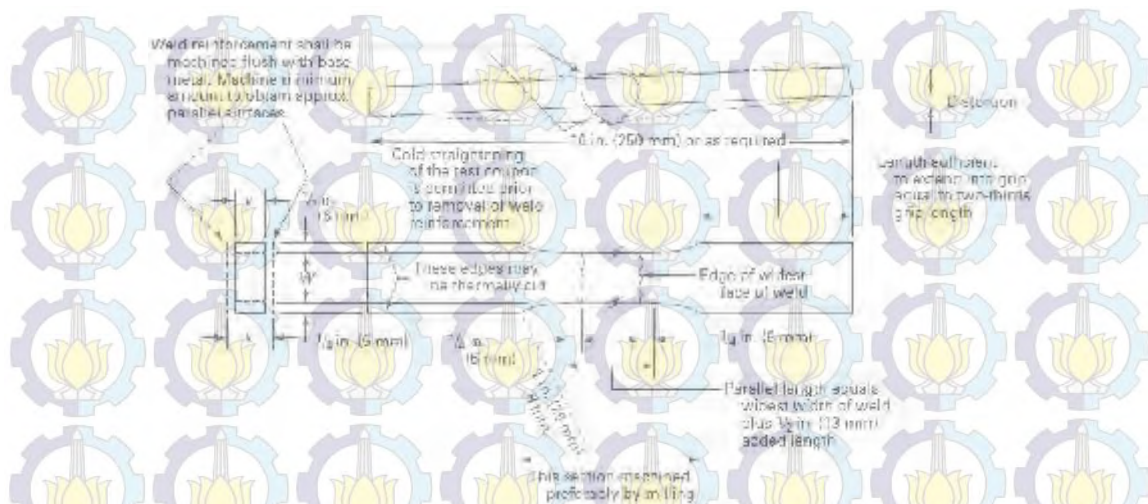
Y : Titik batas mulur

F : Titik patah

E : Titik batas elastisitas

U : Titik batas maksimum

Adapun bentuk dan ukuran spesimen uji tarik berdasarkan ASME IX 2010 dan dapat dilihat pada Gambar 3.8 dibawah berikut ini.



Gambar 3.8 Spesimen uji tarik (ASME IX, 2010)

Keterangan :

- T : Tebal spesimen tidak termasuk mahkota las
- x : Tebal spesimen termasuk mahkota las
- W : Lebar spesimen, 19 mm (3/4 in)
- y : Tebal spesimen

Pada pengujian ini diperlukan data ukuran benda uji secara aktual yang di ukur dengan bantuan alat ukur seperti jangka sorong dan penggaris mekanik dari masing-masing perlakuan atau variabel diambil 3 (tiga) sampel spesimen uji tarik (lihat Gambar 3.6). Adapun perencanaan pencatatan data seperti yang tampak pada Tabel 3.4 dibawah berikut ini.

Tabel 3.4 Format *record* data dimensi aktual spesimen tarik

<i>Spesimen stamp</i>	<i>Thickness</i>	<i>Width</i>	<i>Area</i>	
Units	(t) mm	(w) mm	(A ₀) mm ²	
√	√	√	√	
√	√	√	√	
√	√	√	√	
√	√	√	√	
<i>Spesimen stamp</i>	<i>Yield Force</i>	<i>Yield Stress</i>	<i>Max Stress</i>	<i>Elongation</i>
Units	kN	MPa	MPa	%
√	√	√	√	√
√	√	√	√	√
√	√	√	√	√
√	√	√	√	√

3.5.2 Pengujian kekerasan

Sebelum dilakukan pengujian kekerasan, spesimen uji kekerasan dihaluskan permukaannya dengan menggunakan Mesin Polish dengan kertas gosok hingga grid 600 dan terakhir diperhalus dengan kain bludru dengan diolesi aluminium karbida (Al₂O₃) sebagai penghilap permukaan specimen hingga permukaan spesimen tampak seperti kaca, lalu dietsa dengan menggunakan larutan nital 2% yaitu dengan menggunakan larutan HNO₃ 2ml + Alkohol 96% 98ml. setelah itu spesimen dikeringkan dengan menggunakan *dryer*.

Dilakukan penandaan pada spesimen uji, yaitu bagian atas, tengah, dan bawah, setiap daerah (logam induk, *HAZ*, dan logam pengisi) diambil 6 titik pada setiap bagian. Mesin uji kekerasan yang digunakan diatur beban identornya, yaitu 30 kgf dengan identor yang digunakan adalah pyramid intan dengan waktu penekanan 15 detik. Lalu tampak pada

mikroskop bekas identor, dihitung d_1 dan d_2 nya dan dirata-rata lalu dimasukkan ke dalam perhitungan HVN seperti terlihat pada persamaan dibawah ini:

$$C_{rata-rata} = \frac{c_1 + c_2}{2} \quad (3.1)$$

$$HVN = \frac{1854 \times P}{a^2} \quad (3.2)$$

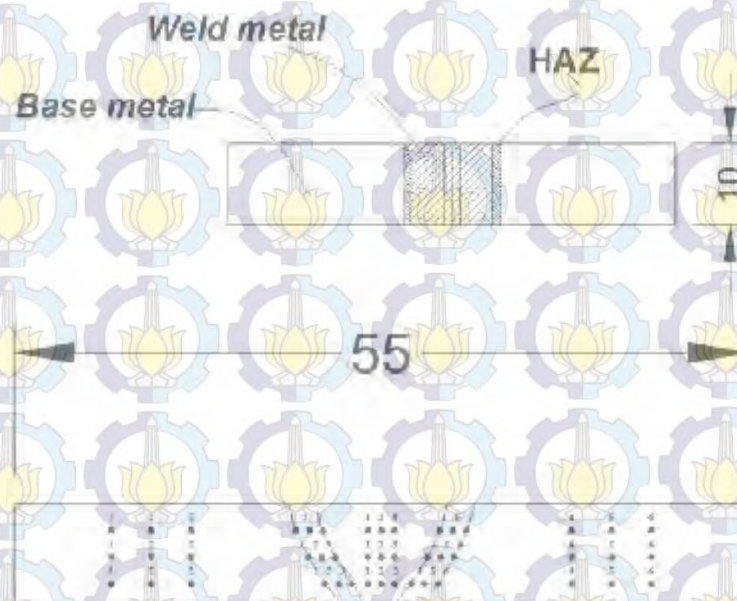
Dimana:

d_1 : Jarak dari ujung ke ujung arah horizontal (mm)

d_2 : Jarak dari ujung ke ujung arah vertical (mm)

P : Beban (kgf)

Bentuk dan ukuran specimen uji kekerasan dapat dilihat pada Gambar 3.9 dimana diambil nilai atas, tengah, dan bawah pada masing-masing daerah dan tiap daerah pada satu garis diambil 3 titik, sehingga satu spesimen diambil 45 titik agar memberikan hasil yang akurat.



Gambar 3.9 Dimensi dan rencana pengambilan titik kekerasan

3.6 Pengujian tegangan sisa menggunakan XRD

X-Ray Diffractometer adalah alat yang dapat memberikan data-data difraksi dan kuantitas intensitas difraksi pada sudut-sudut difraksi (2θ) dari suatu material. Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai tegangan sisa

yang didapatkan dari pergeseran atom yang akan muncul pada grafik yang dilambangkan dengan nilai FWHM. Pada puncak tertinggi nilai FWHM kemudian diubah dari derajat ($^{\circ}$) menjadi radian, lalu dimasukkan kedalam Persamaan 2.8, setelah didapat nilai B kemudian dicari nilai regangan(ϵ) dengan menggunakan Persamaan 2.9. setelah didapat nilai regangan kemudian didapatkan nilai tegangan sisa(σ) dengan Persamaan 2.10. Adapun ilustrasi proses persiapan spesimen untuk uji tegangan sisa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.10 sebagai berikut



Gambar 3.10 Pengambilan spesimen tegangan sisa

Adapun langkah dalam persiapan spesimen adalah sebagai berikut :

1. Spesimen untuk tegangan sisa hasil pemotongan awal dibentuk menyerupai untuk spesimen impak dengan bantuan proses *machining*, dalam penelitian ini spesimen awal dibentuk dengan dimensi panjang 80 mm, lebar 10 mm dan tebal 9 mm.

2. Proses berikutnya melakukan pemolesan (*polishing*) pada permukaan samping mulai dari *grade* 200 sampai 400.
3. Setelah pemolesan dirasa cukup langkah berikutnya melakukan proses pengetsaan dengan larutan nital untuk menghasilkan tampilan area *weld metal*, HAZ dan *base metal* dari spesimen.
4. Proses berikutnya melakukan penandaan pada masing-masing daerah yang sudah teretsa tersebut dengan membentuk 2 (dua) garis diagonal sejajar.
5. Setelah penandaan selesai langkah berikutnya adalah melakukan pemotogan menggunakan *wire cut machine* hingga hasil akhir didapatkan spesimen dengan bentuk seperti trapezium.
6. Proses akhir langsung melakukan penembakan XRD, dimensi spesimen akhir harus disesuaikan dengan kemampuan dimensi maksimum yang bisa diterima pada *stage* XRD yang digunakan. Khusus dalam penelitian ini menggunakan dimensi lebar 9 mm dan tebal maksimum 3 mm.

3.7 Analisa dan Pembahasan

Analisa dan pembahasan dilakukan pada hasil dari pengujian spesimen uji.

Dari hasil uji struktur mikro akan didapatkan hasil pengaruh pengelasan *multiple repair* terhadap tampilan struktur makro dan mikro pada tiap daerah (*base metal*, HAZ, dan *weld metal*). Melalui pengujian tarik, kekerasan dan tegangan sisa menggunakan XRD diharapkan didapatkan hasil analisa banyaknya pengelasan *multiple repair* yang masih layak untuk diaplikasikan.

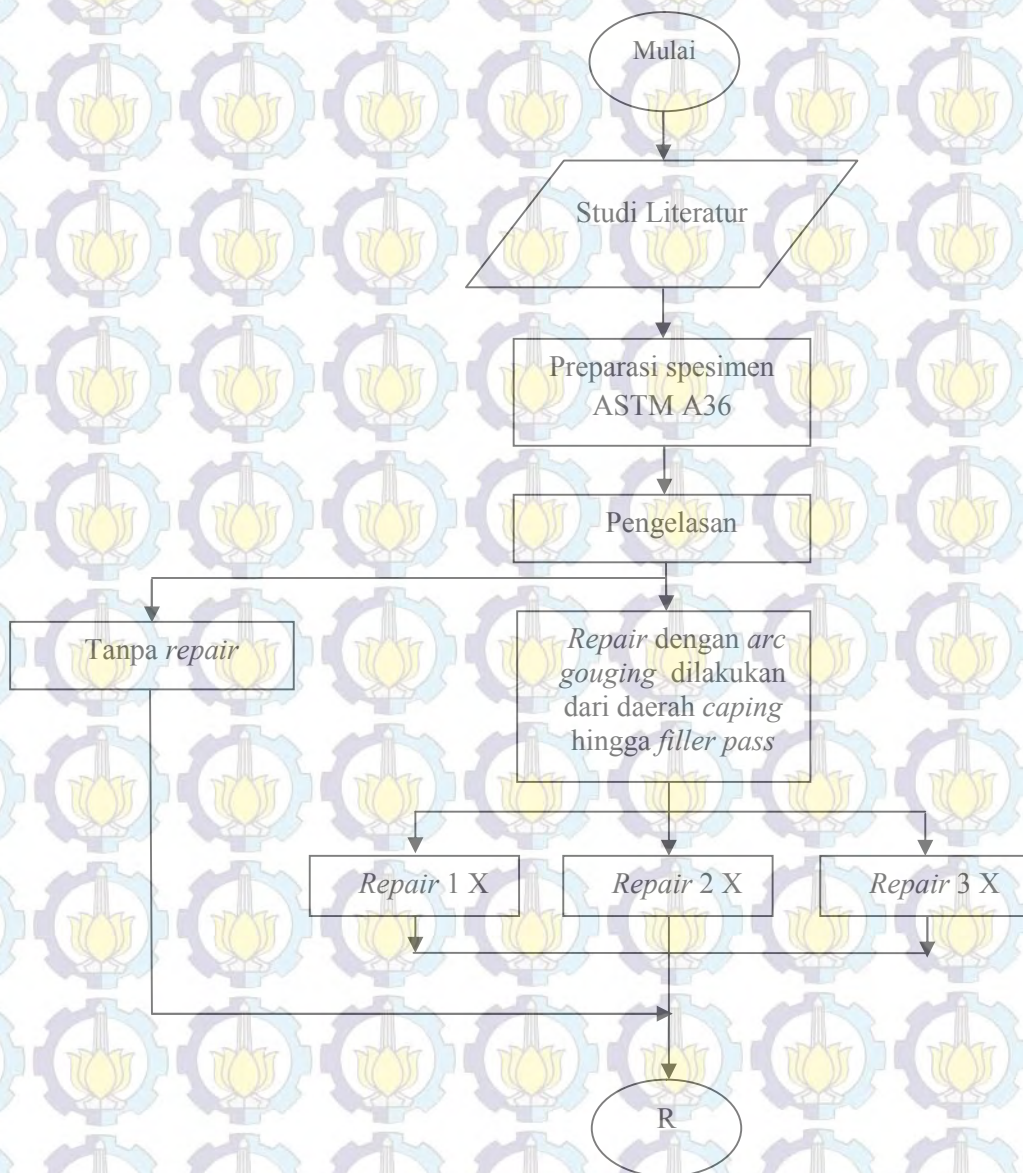
3.8 Kesimpulan dan Saran

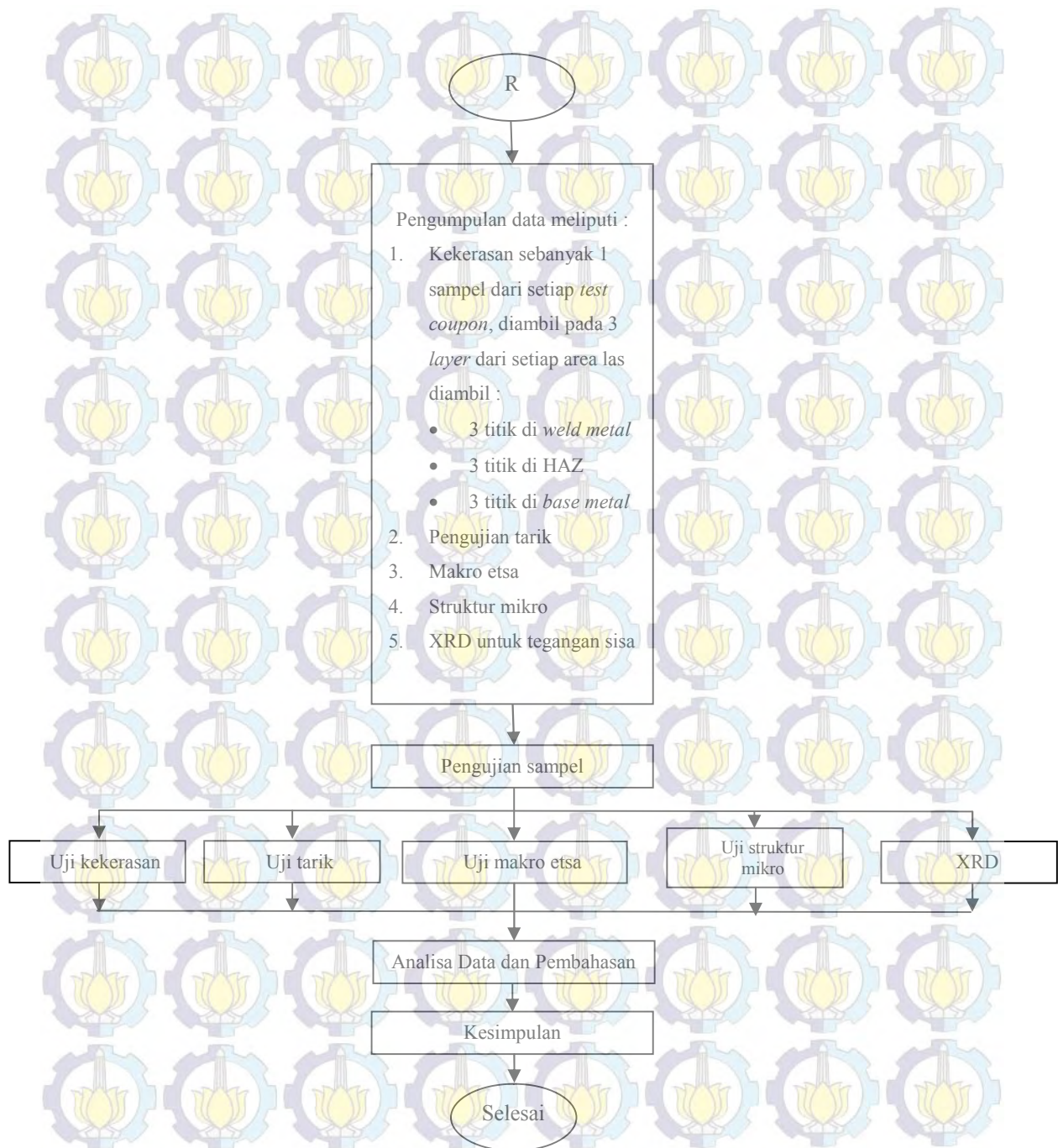
Dari hasil analisa, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- ❖ Hasil pengujian struktur makro dan mikro
- ❖ Hasil pengujian tarik
- ❖ Hasil pengujian kekerasan
- ❖ Hasil pengujian tegangan sisa menggunakan XRD

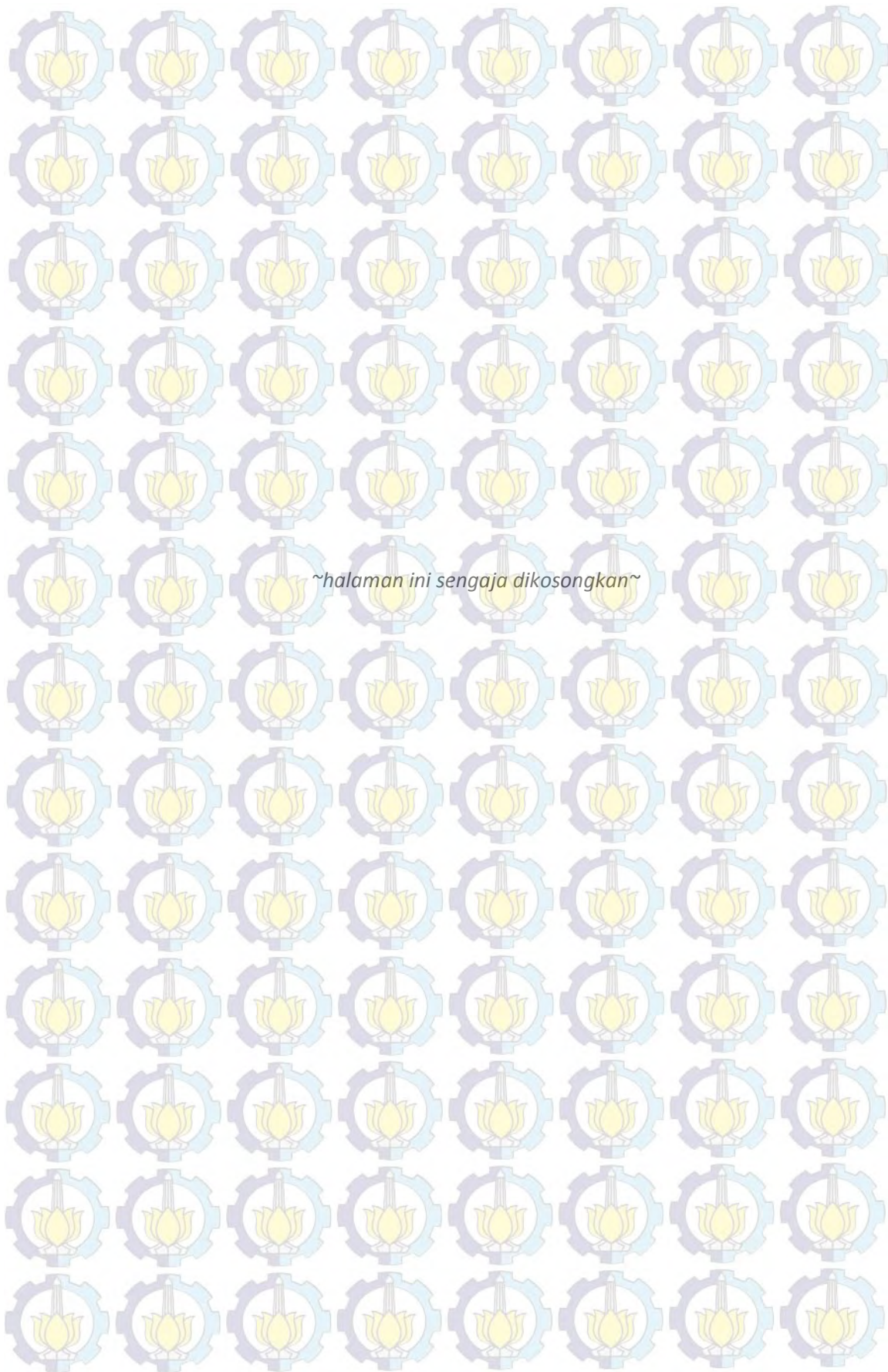
3.9 Diagram Alir Penelitian

Agar dapat mempermudah pelaksanaan penelitian, maka terlebih dahulu dilakukan yaitu merencanakan urutan proses secara sistematis sehingga tujuan penelitian dapat tercapai. Adapun urutan proses penelitian ditunjukkan pada diagram alir di bawah ini:





Gambar 3.11 Diagram Alir Penelitian



BAB IV

ANALISA DATA PENELITIAN

Setelah eksperimen, selanjutnya dilakukan pengujian untuk mendapatkan data-data yang akan dianalisa lebih lanjut. Data yang diperoleh yaitu data struktur makro, struktur mikro, data uji tarik, data uji kekerasan, dan data uji tegangan sisa menggunakan XRD.

4.1 Analisa Hasil Pengujian Metalografi

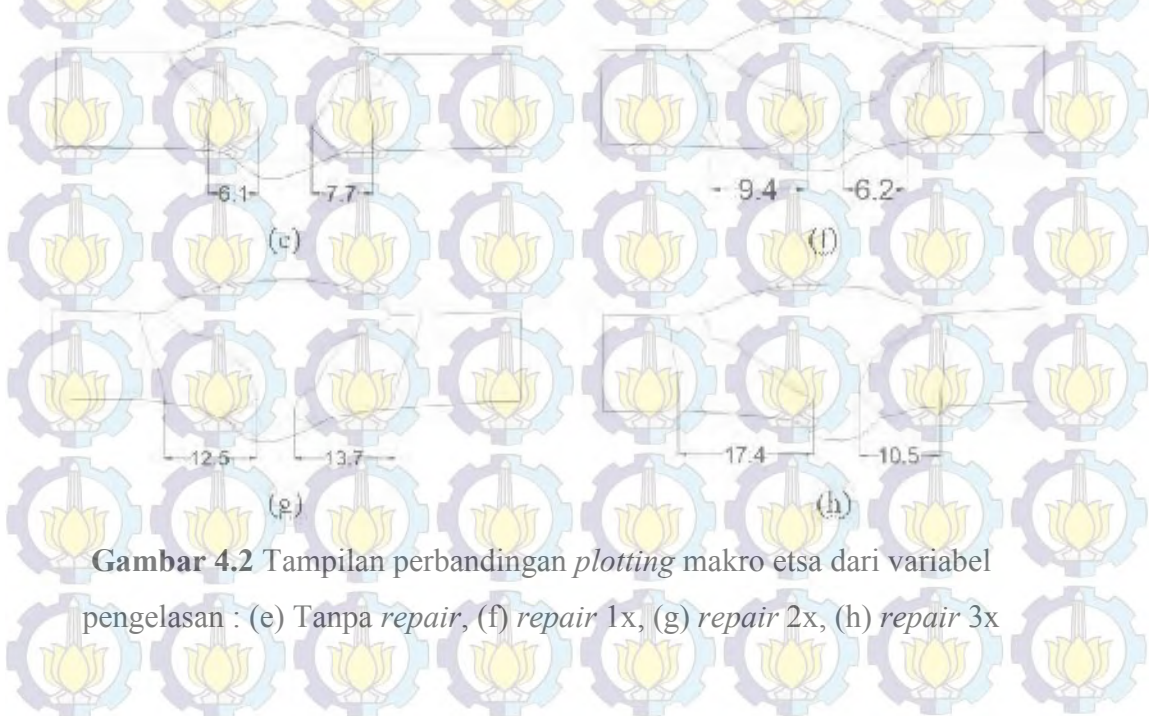
Pengujian metalografi dilakukan dengan bertujuan untuk menampilkan gambaran struktur baik secara makro maupun mikro dari spesimen. Pengambilan sampel dilakukan pada area logam induk (*base metal*), HAZ (*Heat Affected Zone*) dan logam pengisi (*weld metal*) pada setiap variabel penelitian pengelasan *multiple repair* yaitu pengelasan tanpa *repair*, pengelasan dengan *repair 1x*, *repair 2x* dan *repair 3x*.

4.1.1 Analisa hasil pengujian struktur makro

Pengujian ini merupakan salah satu pengujian yang penting. Hal ini disebabkan untuk melihat fusi logam las dari hasil pengelasan. Sebelum dilakukan uji makro material harus dipoles terlebih dahulu hingga rata dan mengkilap dengan kertas gosok dengan *grade* yang kasar sampai yang halus, setelahnya menggunakan kain *wool*. Kemudian dilakukan pengetsaan dengan komposisi larutan etsa yang sesuai dengan ASTM E 407 yaitu menggunakan larutan *nital 2%* yaitu asam nitrat 2 % + alkohol 98%. Adapun dibawah berikut ini merupakan hasil pengujian dari makro etsa berikut dengan hasil *plotting*-nya yang ditunjukkan oleh Gambar 4.1 dan Gambar 4.2.



Gambar 4.1 Tampilan perbandingan makro etsa dari variabel pengelasan : (a) Tanpa *repair*, (b) *repair* 1x, (c) *repair* 2x, (d) *repair* 3x

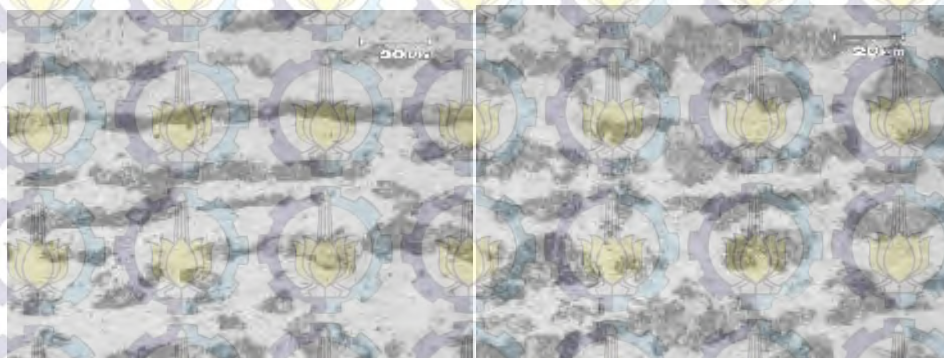


Gambar 4.2 Tampilan perbandingan *plotting* makro etsa dari variabel pengelasan : (e) Tanpa *repair*, (f) *repair* 1x, (g) *repair* 2x, (h) *repair* 3x

Berdasarkan hasil pengamatan tampak jelas bahwa lebar *HAZ* baik pada pengelasan ulang (*repair*) 1x, 2x dan 3x tampak sangat tidak teratur dan cenderung membesar sebagaimana yang ditunjukkan oleh hasil *plotting* seiring dengan semakin bertambahnya proses *repair* yang diberikan, serta ditandai dengan adanya *overlapping* yang menggerus *bevel base metal*. Dipo pada tahun 2010 melalui hasil penelitiannya mengungkapkan hal ini terjadi akibat saat pengelasan ulang panas yang diterima berlebih, selain itu pada proses *gouging* juga berperan menaikkan suhu material hampir 2 kali lebih besar dibandingkan pada saat proses pengelasan. Semakin melebarnya area *HAZ* pada masing-masing spesimen menandakan adanya pertumbuhan butir sebagai akibat semakin banyaknya paparan panas pengelasan dan jumlah *repair* yang diterima pada masing-masing speimen dimana panasnya tersebut mencapai temperature asutenit sehingga cukup untuk merubah dimensi butir pada area *HAZ*.

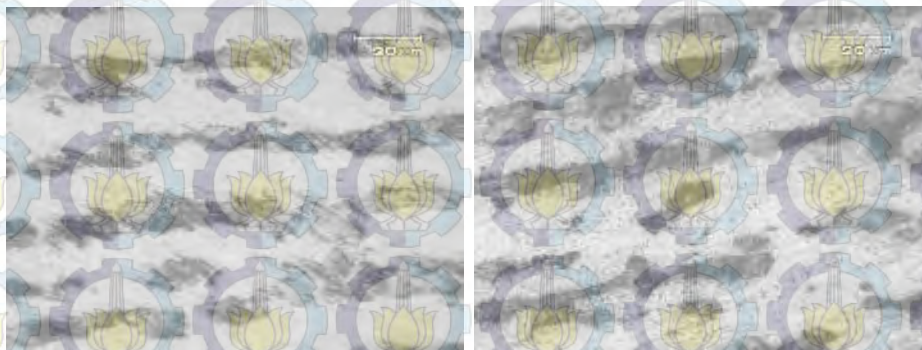
4.1.2 Analisa hasil pengujian struktur mikro

Pengujian struktur mikro dilakukan untuk melihat struktur mikro yang terbentuk akibat proses pengelasan. Struktur mikro yang diamati adalah pada daerah *base metal*, *HAZ*, *fusion line* dan *weld metal*. Adapun hasil pengamatan perbandingan struktur mikro *base metal* pada masing-masing variabel pengelasan tanpa *repair*, *repair* 1x, *repair* 2x dan *repair* 3x ditunjukkan melalui Gambar 4.3 seperti dibawah berikut ini.



(a)

(b)



(c)

(d)

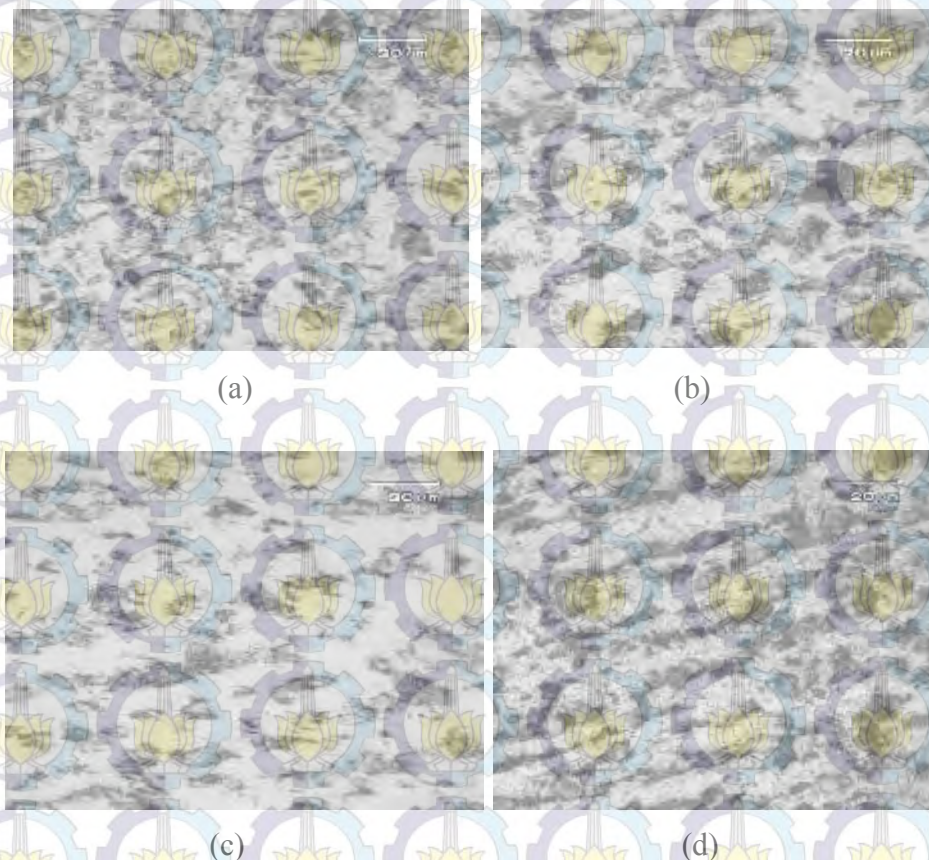
Gambar 4.3 Tampilan perbandingan struktur mikro *base metal* dari variabel pengelasan : (a) Tanpa *repair*, (b) *repair* 1x, (c) *repair* 2x, (d) *repair* 3x

Berdasarkan pengamatan struktur mikro pada *base metal* yang telah dihasilkan dari semua proses pengelasan yang dilakukan, tidak mengalami perubahan bentuk baik pada perlit (hitam) maupun ferit (putih) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 diatas. Mengenai hasil pengolahan gambar mikro secara lebih lengkap bisa dilihat pada Lampiran E.1 sampai dengan E.4. Adapun persentase ferit dan perlit serta ukuran butir perlit pada masing-masing variabel seperti ditunjukkan pada Tabel 4.1 dibawah berikut ini.

Tabel 4.1 Persentase perbandingan ferit dan perlit serta ukuran butir perlit pada *base metal*

Spesimen	Ferit (%)	Perlit (%)	Ukuran butir perlit (ASTM)
Tanpa <i>repair</i>	75.88	24.12	10.575
<i>Repair</i> 1x	65.88	34.12	10.692
<i>Repair</i> 2x	78.64	21.36	10.264
<i>Repair</i> 3x	67.43	32.57	10.317

Melalui data hasil analisa gambar menggunakan *software TAIMAGE* yang tertera pada Tabel 4.1 diatas terungkap bahwa meskipun terdapat perbedaan jumlah persentase ferit dan perlit seperti pada spesimen *repair* 1x dan *repair* 2x bila dibandingkan dengan persentase ferit dan perlit terhadap spesimen yang lain tidak mengindikasikan adanya perubahan struktur mikro yang signifikan, hal ini juga diperkuat dengan nilai ukuran butir perlit yang tetap yaitu pada skala rata-rata ASTM 10 pada masing-masing spesimen. Hal ini pula menandakan bahwa paparan panas yang diterima pada masing-masing *base metal* belum mencapai temperatur austenit. Di bawah berikut ini merupakan perbandingan tampilan hasil struktur mikro pada area HAZ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 dari masing-masing variabel penelitian.



Gambar 4.4 Tampilan perbandingan struktur mikro HAZ dari variabel pengelasan : (a) Tanpa *repair*, (b) *repair* 1x, (c) *repair* 2x, (d) *repair* 3x

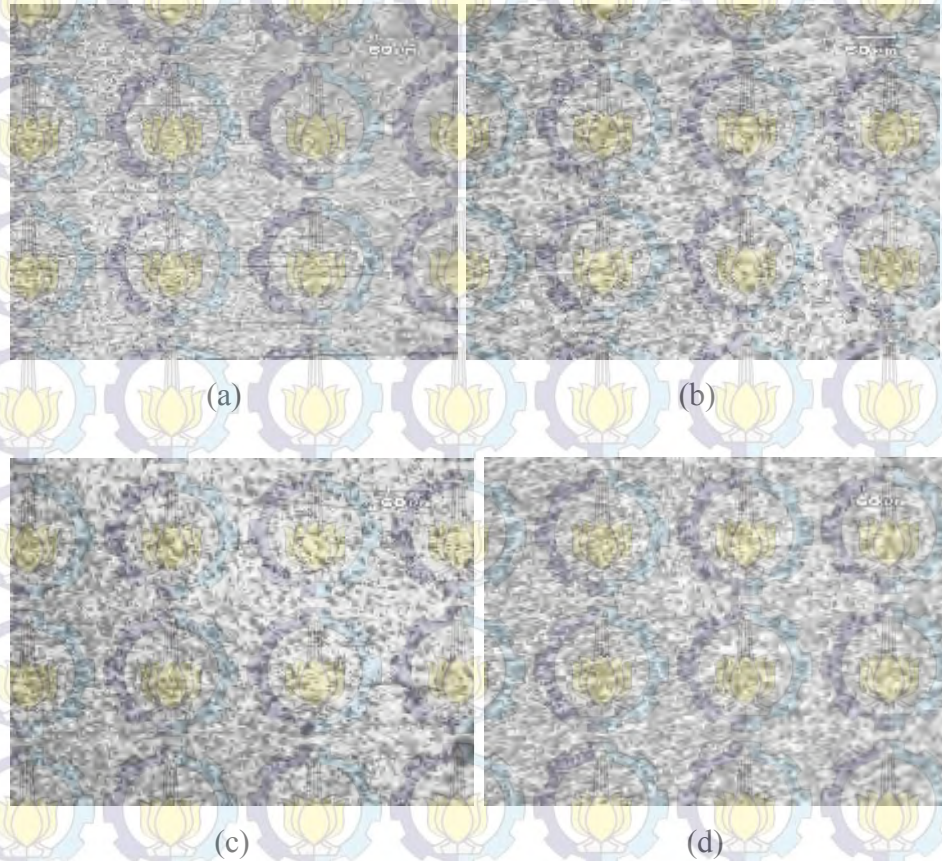
Hasil struktur mikro pada daerah HAZ (Gambar 4.4) akan terlihat berbeda dengan *base metal* dikarenakan paparan panas yang diakibatkan dari proses pengelasan yang dilakukan sudah mulai mampu merubah dimensi dari struktur mikro. Mengenai hasil pengolahan gambar mikro secara lebih lengkap bisa dilihat pada Lampiran E.5 sampai dengan E.8. Adapun data mengenai perbandingan persentase ferit dan perlit serta ukuran butir perlit dapat dilihat pada Tabel 4.2 dibawah berikut ini.

Tabel 4.2 Persentase perbandingan ferit dan perlit serta ukuran butir perlit pada HAZ

Spesimen	Ferit (%)	Perlit (%)	Ukuran butir perlit (ASTM)
Tanpa <i>repair</i>	74.78	24.22	8.935
<i>Repair 1x</i>	73.74	26.26	9.080
<i>Repair 2x</i>	70.21	29.79	10.046
<i>Repair 3x</i>	64.08	35.92	10.212

Berdasarkan data diketahui bahwa persentase jumlah ferit dan perlit yang beragam dan semakin mengecil nilainya hingga pada spesimen *Repair 3x*. Namun, dilain sisi dapat terlihat bahwa ukuran butir perlit semakin membesar terutama yang terlihat pada spesimen *repair 3x* yaitu sebesar 10.212 skala ASTM. Fenomena terjadi diduga sebagai akibat terus bertumbuhnya ukuran dimensi dari perlit seiring dengan semakin bertambahnya jumlah masukan paparan panas dari peningkatan jumlah pengelasan *repair*. Hal ini juga diungkapkan oleh Ulum (2011) melalui penelitiannya mengungkapkan bahwa paparan panas yang diterima pada daerah HAZ minimal mencapai temperatur austenit sehingga mampu membuat struktur mikro pada HAZ mengalami proses *recovery*. Selama *recovery*, tegangan sisa pada struktur mikro memiliki cukup tenaga untuk melepaskan tegangan. Kemudian memasuki fase rekristalisasi atau timbulnya butiran-butiran baru pada batas butir. Dari butiran-butiran baru

tersebut terus tumbuh seiring dengan naiknya temperatur (*grain growth*). Adapun tampilan perbandingan struktur mikro pada area *fusion line* ditampilkan pada Gambar 4.5 dibawah berikut ini.



Gambar 4.5 Tampilan perbandingan struktur mikro *fusion line* dari variabel pengelasan : (a) Tanpa *repair*, (b) *repair* 1x, (c) *repair* 2x, (d) *repair* 3x

Berdasarkan tampilan perbandingan struktur mikro pada Gambar 4.5 terlihat bahwa proses peleburan pada batas butir *base metal* yang tiba-tiba menjadi *fusion line* menjadikan bentuk butirannya seperti kristal-kristal pasir selama proses pengelasan. Perubahan dimensi butuiran akan semakin halus bila mendekati area *weld metal*, terlebih lagi semakin bertambahnya masukan panas sebagai akibat dari proses *gouging* menyebabkan ukuran butir akan semakin halus. Mengenai hasil pengolahan gambar mikro secara lebih lengkap bisa dilihat pada Lampiran

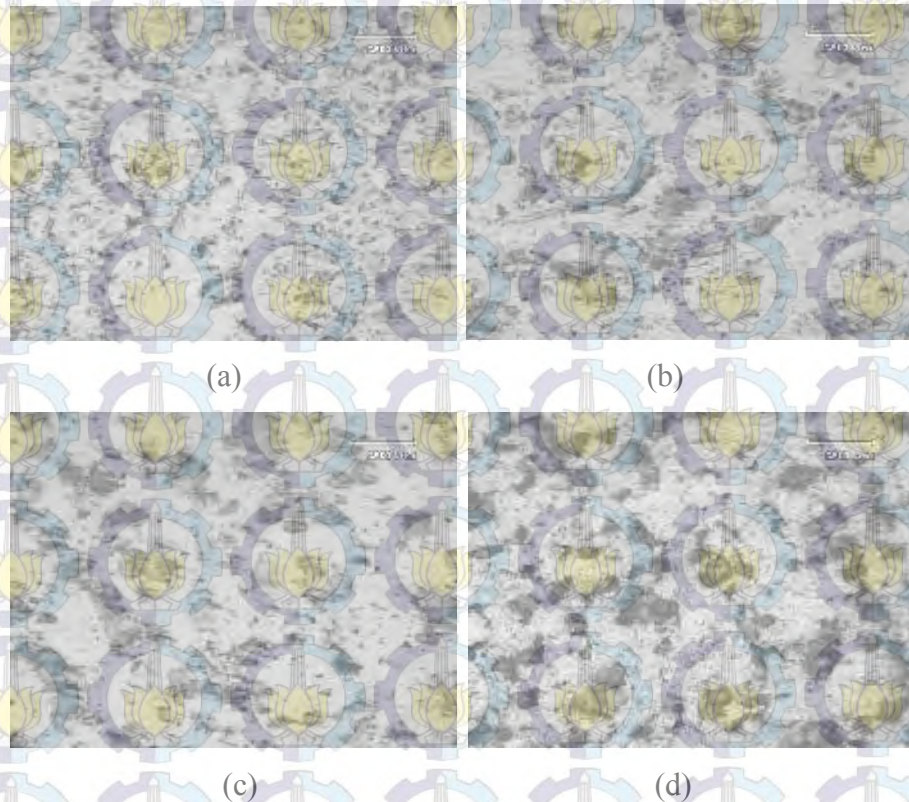
E.9 sampai dengan E.12. Adapun data mengenai perbandingan persentase ferit dan perlit serta ukuran butir perlit dapat dilihat pada Tabel 4.3 dibawah berikut ini.

Tabel 4.3 Persentase perbandingan ferit dan perlit serta ukuran butir perlit pada *fusion line*

Spesimen	Ferit (%)	Perlit (%)	Ukuran butir perlit (ASTM)
Tanpa <i>repair</i>	49.60	50.40	8.309
<i>Repair 1x</i>	57.13	42.87	8.242
<i>Repair 2x</i>	56.33	43.67	6.473
<i>Repair 3x</i>	49.54	50.54	6.367

Perbandingan tampilan struktur mikro pada *fusion line* yang sangat jelas berbeda terdapat pada perbandingan *fusion line* 2x dan 3x, pada struktur mikro *fusion line repair 3x* terlihat bahwa ukuran butir semakin halus dan menyebar merata bila dibandingkan dengan dengan yang lain. Hal ini pula dibuktikan melalui data yang ditampilkan oleh Tabel 4.3, terlihat bahwa perbandingan persentase ferit dan perlit antara spesimen tanpa *repair* dan *repair 3x* memiliki kemiripan yaitu sama-sama hampir mendekati jumlah yang berimbang satu sama lain. Namun, perbedaan lain terletak pada ukuran butir *repair 3x* yang lebih kecil bila dibandingkan baik dengan tanpa *repair*, *repair 1x* dan *repair 2x*. Fenomena ini diduga sebagai akibat dari akumulasi ekspansi panas yang cukup lama sehingga menyebabkan ukuran butir mempunyai waktu yang cukup untuk menyebar secara merata dan menyeragamkan ukuran butirnya sehingga lebih halus tetapi cukup rapat bila dibandingkan dengan struktur mikro *fusion line* pada 1x dan 2x. Hal ini pula sesuai seperti yang diungkapkan oleh Vega (2008) melalui penelitiannya mengungkapkan bahwa pengelasan *repair* yang ke-3x akan memiliki ukuran butir yang cukup seragam dan cukup rapat, ekspansi panas yang semakin lama sebagai akibat panas pengelasan

berikut dengan semakin banyaknya panas *repair* yang dilakukan membuat ukuran butir memiliki waktu yang cukup untuk berubah dimensi serta menyebar secara merata namun cukup rapat. Berikut dibawah ini merupakan perbandingan tampilan striktur mikro pada *weld metal* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Tampilan perbandingan struktur mikro *weld metal* dari variabel pengelasan : (a) Tanpa *repair*, (b) *repair* 1x, (c) *repair* 2x, (d) *repair* 3x

Dalam proses pengelasan bentuk dari *weld metal* pada sambungan ditentukan oleh aliran panas dan metal itu sendiri yang mana peleburan terjadi dari sumber panas dan solidifikasi terjadi dibelakangnya sehingga cenderung arah butirnya mengarah ke arah ke daerah yang paling terakhir mendingin (AWS Welding handbook, 2003). *Heat input* juga mempengaruhi volume dari *weld metal* dan bentuk butiran yang terbentuk di *weld metal* (Vega, 2008). Pada permulaan proses peleburan pada batas

butir *base metal* yang tiba-tiba menjadi *fusion line* menjadikan bentuk butirannya seperti kristal-kristal pasir selama proses pengelasan.

Pertumbuhan butiran yang terus menerus akan menghasilkan bentuk butiran yang *columnar* yang besar yang mana bentuk tersebut menyebabkan mudahnya terbentuk indikasi retak. Tetapi *columnar growth* biasanya akan terhapus apabila proses pengelasan yang dilakukan adalah *multipass* yang mana antara pass yang satu dengan yang lain saling bertumpukan. (Sin do kou, 2002). Mengenai hasil pengolahan gambar mikro secara lebih lengkap bisa dilihat pada Lampiran E.13 sampai dengan E.16. Adapun data mengenai perbandingan persentase jumlah ferit dan perlit serta ukuran butir perlit seperti ditampilkan pada Tabel 4.4 dibawah berikut ini.

Tabel 4.4 Persentase perbandingan ferit dan perlit serta ukuran butir perlit pada *weld metal*

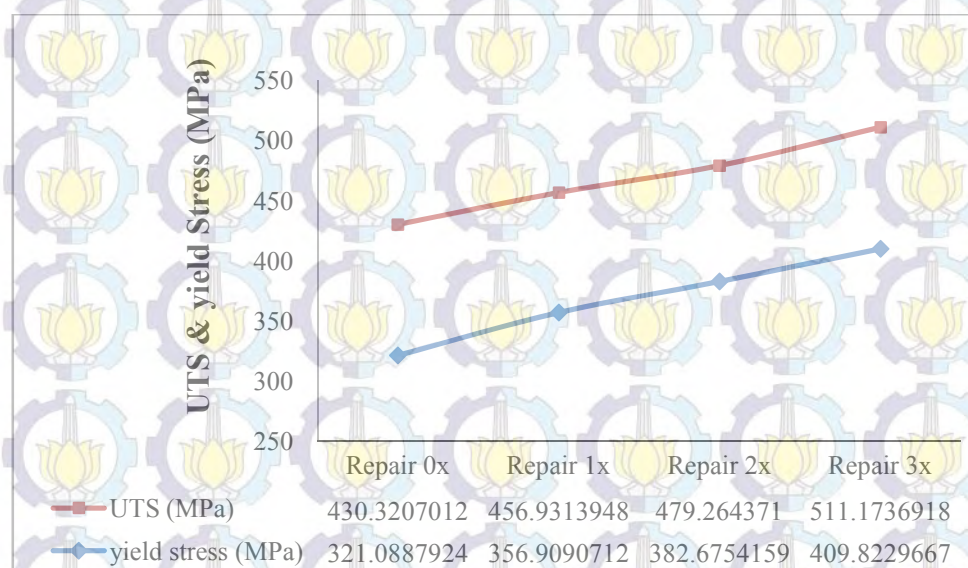
Spesimen	Ferit (%)	Perlit (%)	Ukuran butir perlit (ASTM)
Tanpa <i>repair</i>	80.73	19.27	8.624
<i>Repair 1x</i>	76.49	23.51	9.314
<i>Repair 2x</i>	66.53	33.47	9.812
<i>Repair 3x</i>	69.12	30.88	10.175

Berdasarkan data dari Tabel 4.4 dapat diketahui bahwa terjadi pertumbuhan butir secara bertahap, hal ini dapat dilihat dari semakin besarnya nilai skala ukuran butir ASTM pada spesimen *repair 3x*. Fenomena ini semakin memperkuat bukti bahwa semakin banyaknya masukan panas yang diberikan baik panas dari pengelasan maupun dari *gouging* akan mengakibatkan semakin membesarnya ukuran butir pada *weld metal*. Namun di sisi lain terdapat penurunan persentase jumlah ferit dan perlit pada spesimen *repair 3x*. Hal ini bila merujuk pada gambar

struktur mikro pada masing-masing spesimen, terlihat bahwa semakin mendekati *repair* 3x ukuran struktur mikro akan cenderung seragam tetapi memiliki ukuran butir perlit yang cukup besar bila dibandingkan dengan yang lain. Fenomena ini dapat merujuk pada penjelasan dari Ulum (2011) melalui penelitiannya mengungkapkan bahwa pada *weld metal* dengan *repair* 3x akan mengalami proses *overheating*. Sebagaimana yang dimaksud proses *overheating* disini adalah *weld metal* mengalami paparan panas yang cukup tinggi atau minimal sudah mencapai temperatur austenit, menyebabkan struktur mikro yang berbentuk *columnar* mengalami *grain growth*.

4.2 Analisa Hasil Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan referensi ASME IX 2010 tentang standar untuk pelaksanaan pengujian tarik. Masing-masing variabel dari penelitian pengelasan *multiple repair* diambil sebanyak 3 (tiga) buah spesimen uji tarik yang kemudian dari hasil pengujian diambil nilai rata-ratanya sehingga tampilan data akan tampak seperti pada Gambar 4.7 dibawah berikut ini. Mengenai hasil pengolahan data uji tarik pada masing-masing spesimen secara lebih lengkap bisa dilihat pada Lampiran A.1 sampai dengan A.4.



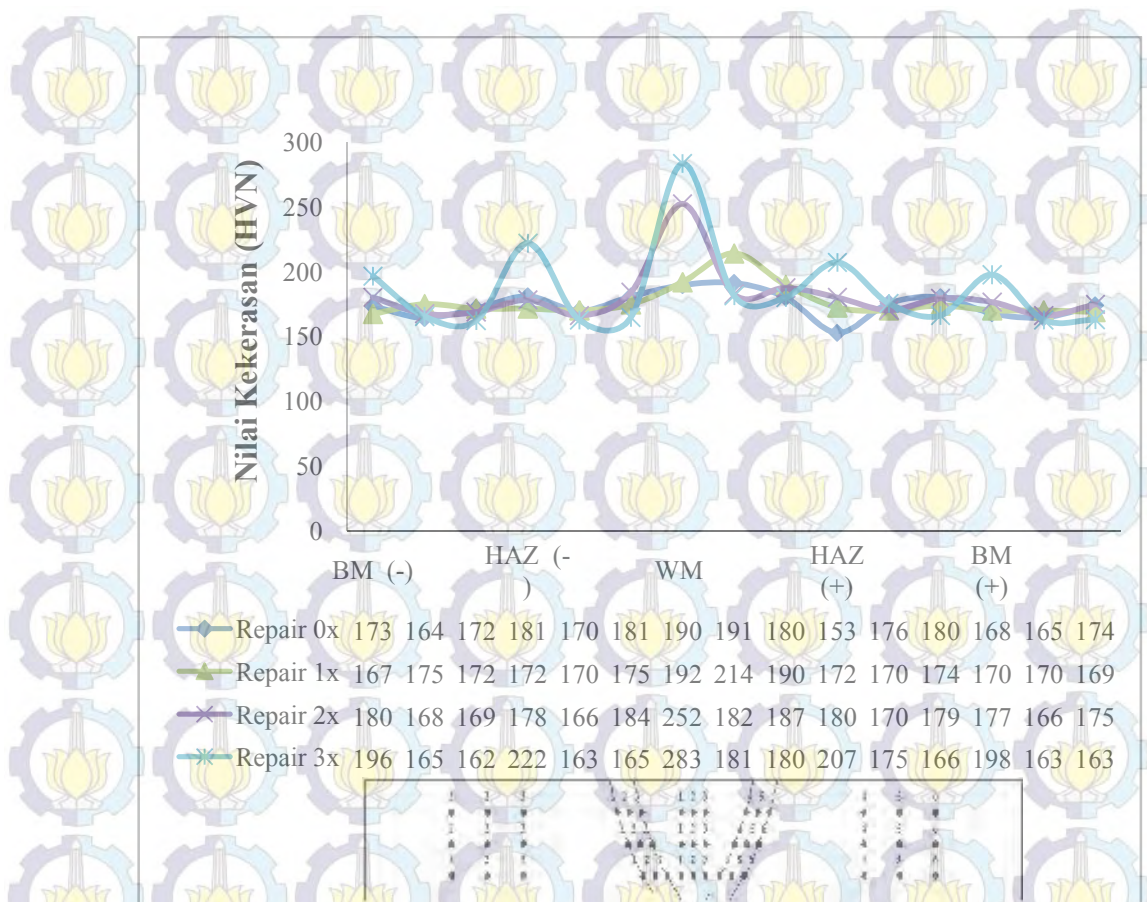
Gambar 4.7 Grafik nilai rata-rata hasil uji tarik

Berdasarkan tampilan data pada Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa terdapat peningkatan hasil nilai tarik dan *yield stress* rata-rata. Kenaikan tersebut bila merujuk pada ketentuan tarik minimum baja ASTM A36 yang disyaratkan berkisar pada 400-500 MPa, maka dapat dipastikan rentang nilai tarik sambungan pengelasan *multiple repair* 1x, 2x dan 3x dengan nilai rata-rata uji tarik masing-masing sebesar 456.931 MPa, 479.264 MPa dan 511.173 MPa masih diperbolehkan untuk dipergunakan bila merujuk pada ketentuan yang tertera pada ASME IX 2010. Dimana salah satu poinnya tertulis bahwa nilai hasil uji tarik dari sambungan las minimal sama seperti nilai tarik pada logam induk.

Meningkatnya nilai rata-rata uji tarik pada setiap spesimen bila merujuk pada hasil perbandingan struktur mikro di *weld metal* seperti yang tampak pada Gambar 4.6 memang saling bersesuaian satu sama lainnya, semakin besarnya ukuran butir perlit pada area di *weld metal* dapat berpengaruh terhadap kenaikan nilai uji tarik pada material ASTM A36. Di lain sisi, ukuran butir perlit di *weld metal* pada spesimen *repair* 3x yang menyebar merata dan cukup rapat kemungkinan juga berpengaruh terhadap meningkatnya nilai tarik rata-rata pada sambungan lasan di spesimen *repair* 3x. Meskipun nilai rata-rata hasil uji tarik masih diperbolehkan bila merujuk pada ketentuan standar ASME IX 2010, tetapi naiknya nilai tersebut harus diinvestigasi lebih lanjut dengan pengujian yang lain yang dalam penelitian ini menggunakan pengujian kekerasan dan pengujian tegangan sisa menggunakan XRD. Hal ini bertujuan untuk mencari bukti lain yang meyakinkan bahwa material ASTM A36 bila dilakukan pengelasan *repair* sampai 3x masih diperkenankan untuk digunakan.

4.3 Analisa Hasil Pengujian Kekerasan

Data perbandingan hasil nilai kekerasan pada daerah logam induk (*base metal*), HAZ, dan logam pengisi (*weld metal*) untuk variabel tanpa *repair*, *repair* 1x, *repair* 2x dan *repair* 3x. adapun tampilan hasil data pengujian kekerasan dapat dilihat pada Gambar 4.8 sebagai berikut. Mengenai hasil pengolahan data uji kekerasan pada masing-masing spesimen secara lebih lengkap bisa dilihat pada Lampiran B.1 sampai dengan B.4.



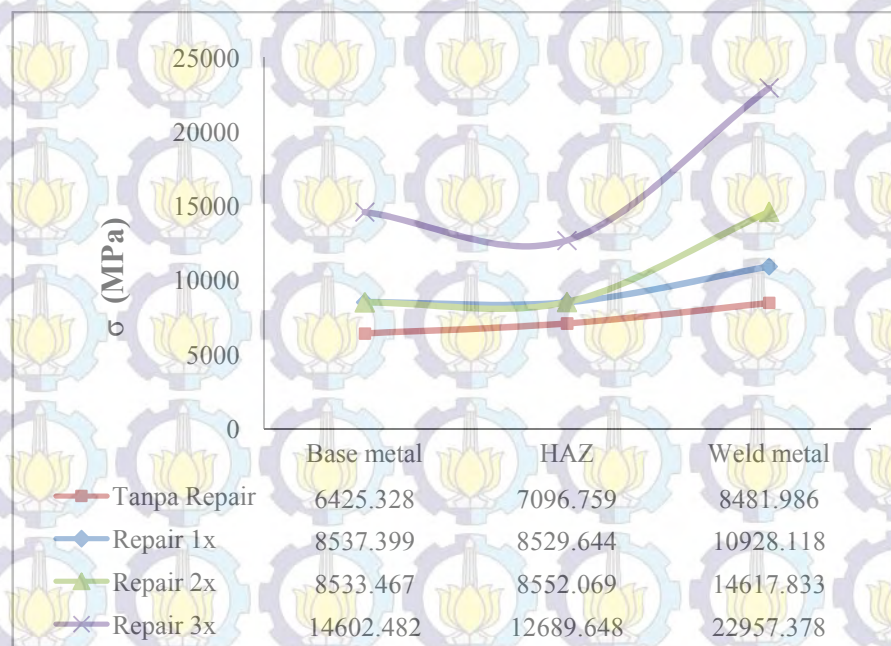
Gambar 4.8 Grafik nilai rata-rata sebaran hasil uji kekerasan

Dari grafik tersebut dapat dilihat distribusi nilai kekerasan rata-rata pada spesimen hasil las tanpa *repair* merupakan yang paling rendah bila dibandingkan dengan yang lain. Hal ini bila merujuk pada tampilan gambar struktur mikro tanpa *repair* mulai dari Gambar 4.1 sampai dengan Gambar 4.6, dilihat dari ukuran butirnya yang tidak terlalu besar sebagai akibat masukan panas yang belum terlalu banyak. Berbeda dengan spesimen tanpa *repair* pada spesimen *repair* 1x, 2x dan 3x terlihat adanya peningkatan yang cukup signifikan terhadap sebaran nilai kekerasan di semua area. Area titik kekerasan pada HAZ menunjukkan nilai yang relatif menurun pada masing-masing variabel, hal ini menandakan adanya pertumbuhan butir pada area tersebut sebagaimana seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.2. Menurut Hall (1951) dan Petch (1953) pertumbuhan butir pada area HAZ berbentuk kasar dan akan menyebabkan kekuatan logam menurun sedangkan transformasi fasa yang terjadi di daerah tersebut juga akan diiringi dengan

adanya temperature gradient. Secara umum di daerah ini terjadi proses perlakuan panas dengan segala macam aspek yang mempengaruhinya seperti tingginya lamanya temperature pemanasan, laju pendinginan, termasuk ada atau tidaknya *pre heat* dan *post heat* serta jenis fasa yang dihasilkan. Struktur mikro HAZ yang ditampilkan memang menjadi bukti adanya pertumbuhan butir yang menyebabkan menurunnya nilai kekerasan HAZ rata-rata pada masing-masing spesimen sebagai akibat paparan panas yang semakin meningkat. Indikasi pertumbuhan butir pada HAZ yang menyebabkan menurunnya nilai kekerasan, hal ini tidak berlaku pada area *weld metal* yang memiliki ukuran butir yang semakin membesar, terutama spesimen *repair 3x*, dimana semakin membesar ukuran butir justru berakibat semakin tingginya nilai kekerasan, hal ini dimungkinkan karena berdasarkan hasil pengamatan struktur mikro pada area tersebut (lihat Gambar 4.6 (d)) terungkap bahwa pada spesimen *repair 3x* sebaran ukuran butir mulai teratur sehingga ruang antar struktur ferit dan perlit semakin rapat dikarenakan hal inilah nilai kekerasan semakin meninggi. Hal yang sama dilaporkan oleh Vega (2008). Baik hasil uji tarik sebelumnya maupun hasil uji kekerasan menunjukkan tren kenaikan nilai hasil yang sama satu sama lain, tetapi hasil uji kekerasan ini belum bisa dijadikan referensi untuk menilai seberapa banyaknya pengelasan *repair* pada baja ASTM A36 yang masih baik untuk diaplikasikan.

4.4 Analisa Hasil Pengujian Tegangan Sisa Menggunakan XRD

Data perbandingan hasil nilai tegangan sisa menggunakan XRD diambil pada daerah *weld metal*, HAZ dan *base metal* untuk variabel tanpa *repair*, *repair 1x*, *repair 2x* dan *repair 3x* dapat dilihat pada Gambar 4.9 sebagai berikut. Mengenai hasil pengolahan data uji tegangan sisa pada masing-masing spesimen secara lebih lengkap bisa dilihat pada Lampiran D.1 sampai dengan D.12.



Gambar 4.9 Grafik nilai rata-rata total tegangan pada masing-masing spesimen

Berdasarkan data yang ditampilkan pada Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa hasil nilai XRD dari seluruh variabel bervariasi. Pada daerah *base metal* di variabel tanpa *repair*, dapat dilihat nilai pada grafik cukup rendah dikarenakan paparan panas dari pengelasan tidak begitu terlalu banyak kemudian akan meningkat pada area HAZ hingga *weld metal* yang menandakan adanya pertumbuhan butir dari proses pengelasan dan bersesuaian dengan tampilan struktur mikro pada Gambar 4.3 (a), Gambar 4.4 (a), Gambar 4.5 (a) dan Gambar 4.6 (a). Nilai tegangan sisa dari spesimen tanpa *repair* pada masing-masing area tidak terlalu tinggi, hal ini dikarenakan panas yang diterima hanya berasal dari panas pengelasan saja tanpa ada panas dari *gouging* sehingga pertumbuhan butir pada masing-masing area relatif lebih rendah bila dibandingkan dengan variabel yang lain.

Pada spesimen *repair 1x* mulai terlihat adanya kenaikan nilai tegangan di semua area baik pada *base metal*, HAZ maupun *weld metal* kenaikan ini menandakan adanya perubahan yang cukup signifikan pada pertumbuhan butirnya sebagaimana yang ditampilkan pada struktur mikronya pada Gambar 4.3 (b), Gambar 4.4 (b), Gambar 4.5 (b) dan Gambar 4.6 (b). Masing-masing

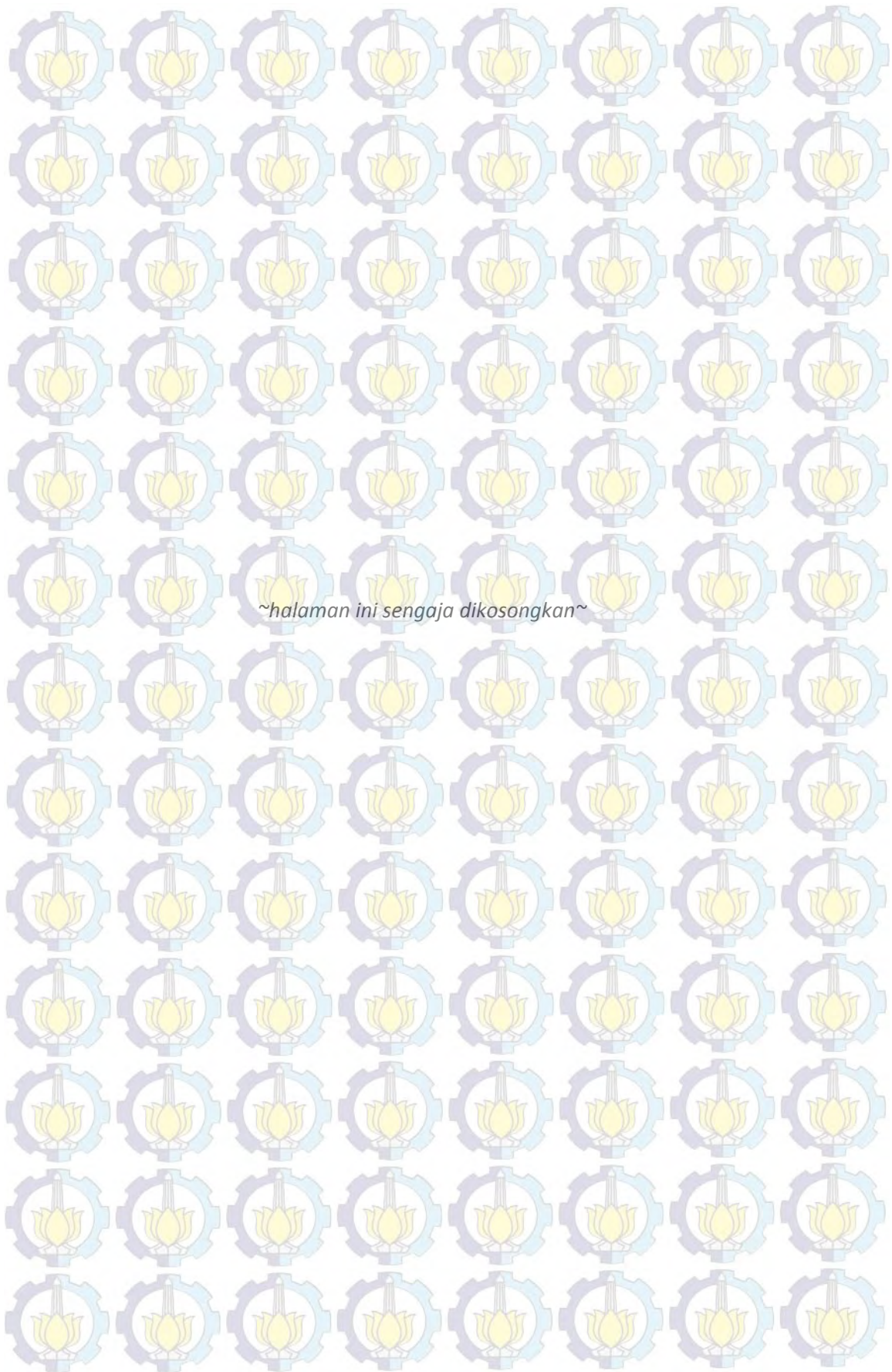
dari tampilan struktur mikro tersebut menampilkan pertumbuhan butir yang lebih besar bila dibandingkan dengan tanpa *repair* dan secara bertahap mulai meningkat ukuran butirannya, peningkatan tersebut dipastikan karena paparan panas yang diterima pada spesimen *repair* 1x selain menerima panas dari pengelasan juga menerima panas dari *gouging* untuk proses *repair* sebanyak 1x. Pertambahan ukuran butir HAZ pada *repair* 1x sebesar 9.080 dan 10.046 pada *repair* 2x ternyata berdasarkan hasil pengujian tegangan sisa menghasilkan nilai yang sama.

Pada *repair* 2x mulai terlihat adanya kenaikan nilai tegangan di semua area baik pada *base metal*, HAZ maupun *weld metal* kenaikan ini menandakan adanya kenaikan yang cukup signifikan pada pertumbuhan butirnya sebagaimana yang ditampilkan pada struktur mikronya pada Gambar 4.3 (c), Gambar 4.4 (c), Gambar 4.5 (c) dan Gambar 4.6 (c). Masing-masing dari tampilan struktur mikro tersebut menampilkan pertumbuhan butir yang lebih besar bila dibandingkan dengan tanpa *repair* dan *repair* 1x serta secara bertahap mulai meningkat ukuran butirannya, peningkatan tersebut dipastikan karena paparan panas yang diterima pada spesimen *repair* 2x selain menerima panas dari pengelasan juga menerima panas dari *gouging* untuk proses *repair* sebanyak 2x.

Pada area HAZ jarak maupun ukuran butir perlit (lihat Gambar 4.4 (c)), yang belum cukup merata dan seragam menghasilkan tegangan sisa dengan nilai yang relatif sama bila dibandingkan dengan spesimen *repair* 1x. Hal yang cukup kontras terlihat pada area *weld metal* baik pada hasil pengukuran sebaran nilai kekerasan maupun hasil pengukuran tegangan sisa juga menghasilkan tren kenaikan yang relatif cukup tinggi bila dibandingkan dengan spesimen tanpa *repair* dan *repair* 1x. Kerapatan struktur mikro pada area *weld metal* kemungkinan menjadi penyebab naiknya nilai tegangan pada area ini, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 (c). Hal ini pula menandakan kombinasi paparan panas yang diterima pada *weld metal* baik dari panas pengelasan maupun banyaknya panas akibat *gouging* untuk *repair* 2x akan memacu pertumbuhan butir lebih besar sehingga meningkatkan nilai mekanik dan tegangan sisanya.

Pada *repair* 3x mulai terlihat adanya kenaikan nilai tegangan di semua area baik pada *base metal*, HAZ maupun *weld metal* kenaikan ini menandakan adanya kenaikan yang cukup signifikan pada pertumbuhan butirnya sebagaimana yang ditampilkan pada struktur mikronya pada Gambar 4.3 (d), Gambar 4.4 (d), Gambar 4.5 (d) dan Gambar 4.6 (d). Masing-masing dari tampilan struktur mikro tersebut menampilkan pertumbuhan butir yang jauh lebih besar dan meningkat ukurannya bila dibandingkan dengan tanpa *repair*, *repair* 1x dan *repair* 2x, peningkatan tersebut dipastikan karena kombinasi paparan panas yang diterima pada spesimen *repair* 3x selain menerima panas dari pengelasan juga menerima panas dari *gouging* untuk proses *repair* sebanyak 3x jauh lebih banyak bila dibandingkan dengan variabel yang lain.

Selain ditinjau melalui struktur mikronya hasil uji mekanik yang lain seperti uji tarik maupun uji kekerasan (terkecuali kekerasan pada area HAZ) juga menunjukkan tren kenaikan nilai yang meningkat secara drastis sama seperti halnya hasil pengukuran tegangan sisa bila dibandingkan dengan variabel yang lain, sebagai akibat dari tegangan sisa yang semakin membesar seiring dengan semakin bertambahnya jumlah *repair* yang mencapai 3x dimana material menerima kombinasi panas baik dari panas pengelasan maupun panas *gouging* untuk proses *repair*. Meskipun disisi lain ukuran butir pada area *weld metal* spesimen *repair* 3x lebih besar dari pada yang lain tetapi melalui pengamatan struktur mikro yang dihasilkan pada Gambar 4.6 (d) terlihat memang keseragaman perlit yang semakin merata menghasilkan kerapatan yang jauh lebih tinggi sehingga nilai tegangan sisa didalamnya juga semakin besar.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

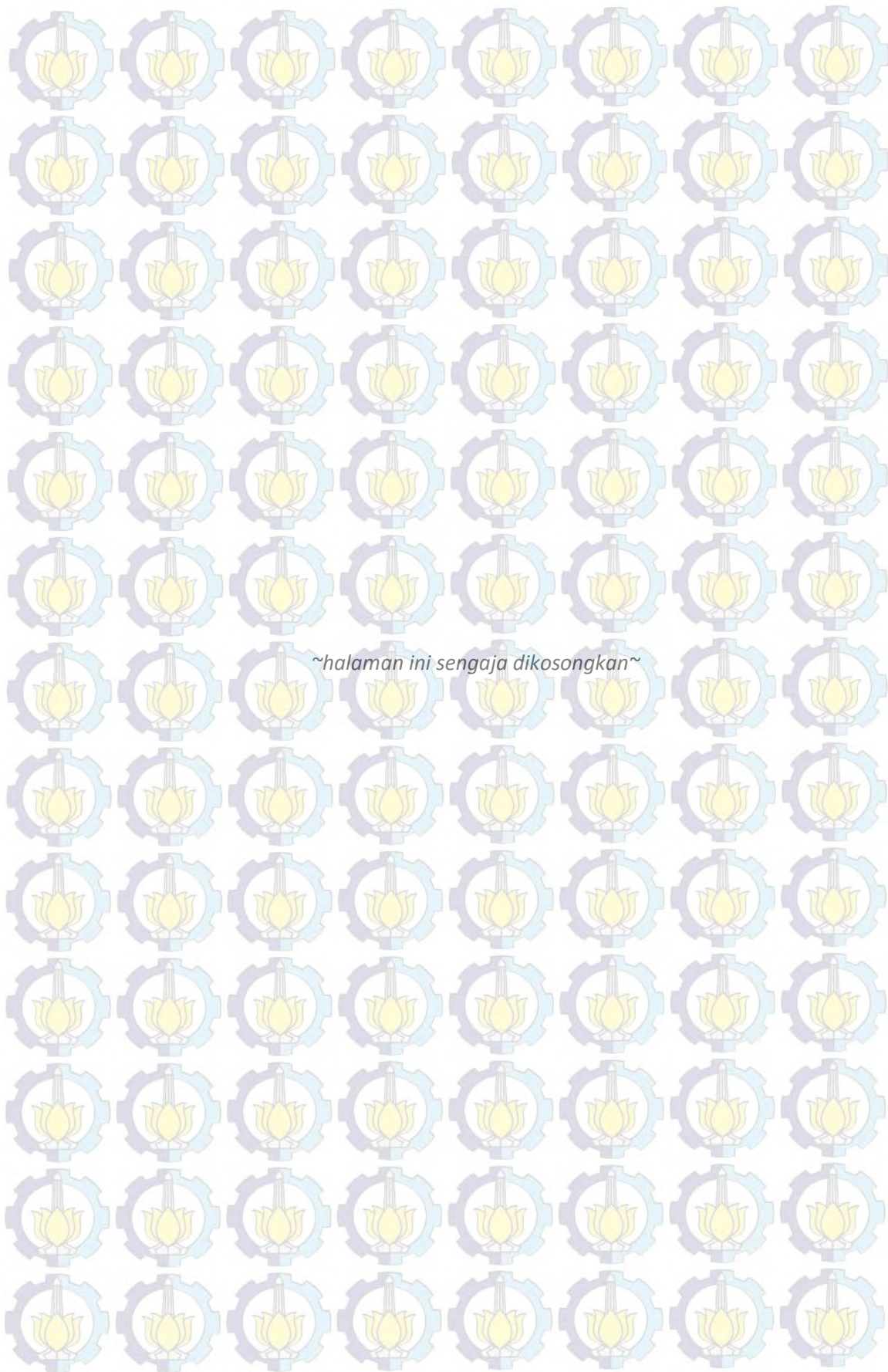
Berdasarkan hasil analisa dari berbagai pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini mengenai pengelasan *multiple repair* pada baja karbon rendah, dimana dalam penelitian ini menggunakan baja ASTM A36 didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Pada tampilan makro terjadi peningkatan lebar rata-rata HAZ sebesar 10.4% pada masing-masing variabel. Pada pengamatan struktur mikro, struktur material masih berupa ferit dan perlit dengan bentuk lamel dari perlit sangat kecil dan rapat antara lamel satu dengan lamel yang lain. Perubahan yang terjadi ada pada persentase nilai ferit dan perlit. Dengan adanya peristiwa seperti perlakuan panas maka jumlah perlit cenderung bertambah pada daerah HAZ. Sedangkan pada daerah base metal jumlah ferit dan perlit cenderung seimbang/tetap
2. Kenaikan nilai rata-rata pada kekerasan sebesar 0.9%, 1.14% dan 9.3% berturut-turut mulai dari spesimen tanpa *repair* sampai dengan *repair* 3x dengan diiringi kenaikan nilai rata-rata total hasil uji tarik sebesar 1.05% diakibatkan karena nilai tegangan sisa yang sangat tinggi seiring dengan bertambahnya jumlah *repair* hingga sebanyak 3x (tiga kali).
3. Terungkap bahwa anjuran untuk banyaknya *repair* sebaiknya dilakukan sebanyak 2x dikarenakan nilai tegangan sisa yang terlalu tinggi yang dihasilkan pada spesimen *repair* 3x, meskipun nilai uji tarik spesimen *repair* 3x masih memenuhi kualifikasi yang di syaratkan oleh ketentuan standar ASME IX 2010.

5.2 Saran

Adapun saran untuk menyempurnakan penelitian ini dan perlu diinvestigasi lebih lanjut untuk memperkaya informasi mengenai pengelasan *multiple repair*, diantaranya adalah :

1. Pada penelitian ini, posisi pengelasan adalah 1G (datar). Untuk penelitian selanjutnya, dapat dilakukan dalam posisi pengelasan yang lainnya seperti 2G, 3G dan 4G.
2. Pada penelitian ini melakukan proses *repair* dengan metode *gouging* atau menggunakan proses termal, penelitian berikutnya dapat dilakukan dengan *repair* menggunakan proses permesinan atau lainnya.
3. Pada penelitian ini melakukan proses *repair* dengan rentang waktu jeda 1 hari, penelitian berikutnya dapat divariasikan rentang jeda waktunya.
4. Penelitian lebih lanjut, dapat dilakukan dengan menggunakan variasi elektroda lain.
5. Hendaknya dilakukan pengujian yang lainnya seperti uji *fracture*, *toughness*, uji *fatigue* dan lain sebagainya.



~halaman ini sengaja dikosongkan~

DAFTAR PUSTAKA

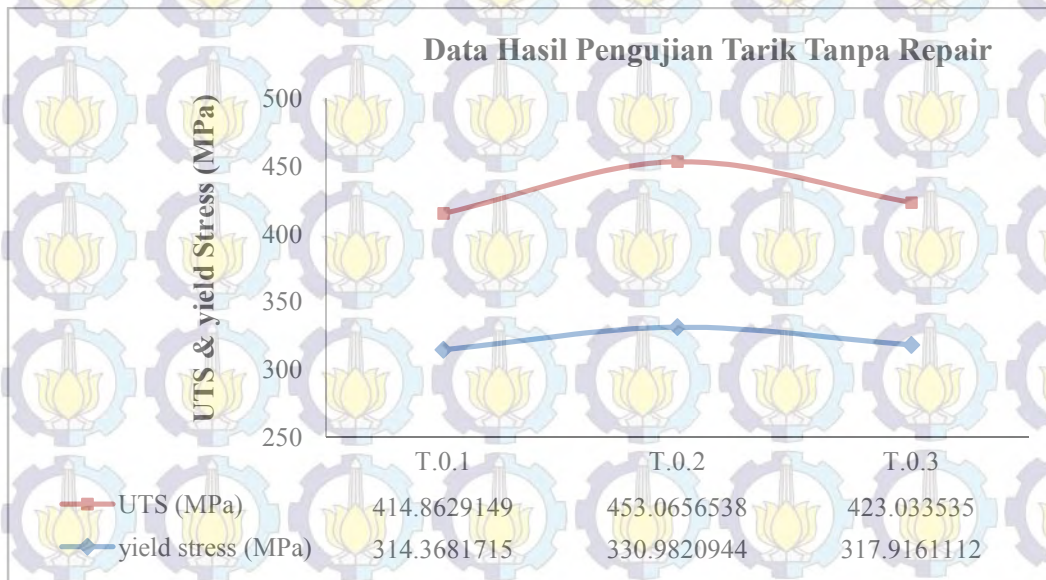
- ASM Handbook (1993), *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, Vol. 1, The American Society of Mechanical Engineers, Ohio.
- ASTM. 2003. ASTM E92-82 (Reapprove 2003), *Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*. ASTM Publishing, Washington.
- ASM Handbook (2005), *Welding, Brazing and Soldering*. Vol.6, 8th edition, ASM International
- ASM Handbook (2005), *Metallography and microstructure*, Vol.9, 8th edition, ASM International
- ASME (2010), *Welding and Brazing Qualification*. Boiler & Pressure Vessel Code Section IX, New York.
- Ashby, Michael F. and Jones, David R. H. (1992), *Engineering Materials 2* (ed. with corrections), ISBN 0-08-032532-7, Pergamon Press, Oxford.
- Basary, R. M. (2006), “*Pengukuran Tegangan Sisa Menggunakan Difraksi Sinar-X dan Strain Gauge pada Pengelasan Submerged Arc Welding*”, Tugas Akhir, Surabaya.
- Hall, E.O. (1951), *The Deformation and Ageing of Mild Steel : III Discussion of result*. Proc. Phys. Soc. London, hal. 64:747-753.
- JIS handbook edition (2004), *Rolled Steel for Welded Structure*, code G 3106, JIS, Japan.
- Kou, Sin do. (2002), *Welding Metalurgy 2nd Edition*, John Wiley & Sons, Inc, New Jersey.
- Mulyaningsih, D.R. (2009), “*Analisa Resiko Cacat Las Pada Pengelasan Tubular Joint Jacket dengan Menggunakan Metode Diagram Ishikawa*”, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Tugas Akhir, Surabaya.
- McGaughy, T. (1990). *Significance of changes in residual stresses and mechanical properties due to SMAW repair girth welds in line pipe*. Edison Welding Institute and Pipeline Research Council International, hal. 1–18.
- Petch, N.J. (1953), *The Cleavage Strength of Polycrystals*, J.Iron Steel Institute, London, hal. 173:25-28.
- Pribadi, Sandi. (2012), “*Analisa multiple Repair Welding Menggunakan Arc Gouging Pada Boogie Loko DH-PT INKA*”, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya-ITS, Tugas Akhir, Surabaya.
- Sonawa, H dan Suratman, R. (1995), *Pengantar Untuk Memahami Proses Pengelasan Logam*, Cetakan ke-3, PT. Pradnya Paramita, Jakarta.

- Suratman, Rochim. (2007), "Beberapa Kasus Pada Pengelasan Baja dan Besi Cor", *Seminar Welding Metallurgy*, Jakarta.
- Sri Yuni, Setyawati. (2011), "Analisa Pengaruh Tegangan Sisa dan Distorsi pada Pengelasan Butt joint dan T-joint dengan Variasi Tebal Plat", Tugas Akhir, Surabaya.
- Ulum, Miftahul. (2011), "Analisis Pengaruh Multiple Repair Welding pada Material Baja Paduan Rendah Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro", Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya-ITS, Tugas Akhir, Surabaya.
- Vega, O.E. (2008), "Effect of multiple repairs in girth welds of pipelines on the mechanical properties", Departamento de Ingenieria Metalurgica, Mexico.
- Wiryosumarto, H. dan Okumura, T. (2004), *Teknologi Pengelasan Logam*. PT Pradnya Paramita, Jakarta.
- Wirarchi, Dipo. (2010), "Analisa Pengaruh Multiple Repair Welding Pada Material Propeties Weld Joint Material Pipa ASTM A106 Gr.B SCH 80", Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Tugas Akhir, Surabaya.

LAMPIRAN

Lampiran A. Data dan Grafik Rata-Rata Hasil Uji Tarik

Lampiran A.1 Data uji tarik material tanpa *repair*



Spesimen	l_0	l_f	A_0 (mm ²)	Data Hasil Pengujian Tarik Tanpa Repair				l_1	l_2	A_1 (mm ²)	Keterangan Parah
				yield point (N)	Force yield (N)	yield stress (MPa)	UTS (MPa)				
T.0.1	19.8	9.8	184.34	60000	80500	314.3681715	414.8629149	14.1	7.1	101.52	Logam Induk
T.0.2	19	9.7	184.3	60000	83500	330.9820944	453.0656538	14	7.3	118.3	Logam Induk
T.0.3	19.8	9.8	184.02	62000	82500	317.9161112	423.033535	15	6.2	93	Logam Induk
Rata-rata	19.53333333	9.76666667	184.22	60666.66667	82166.66667	321.083024	430.3207112	14.4	7.1	101.54	

Lampiran A.2 Data uji tarik material *repair 1x*

Data Hasil Pengujian Tarik Repair 1x

UTS & yield Stress (MPa)

500
450
400
350
300
250

T.1.1

T.1.2

T.1.3

— UTS (MPa)

— yield stress (MPa)

437.1997625

468.8672168

464.7272051

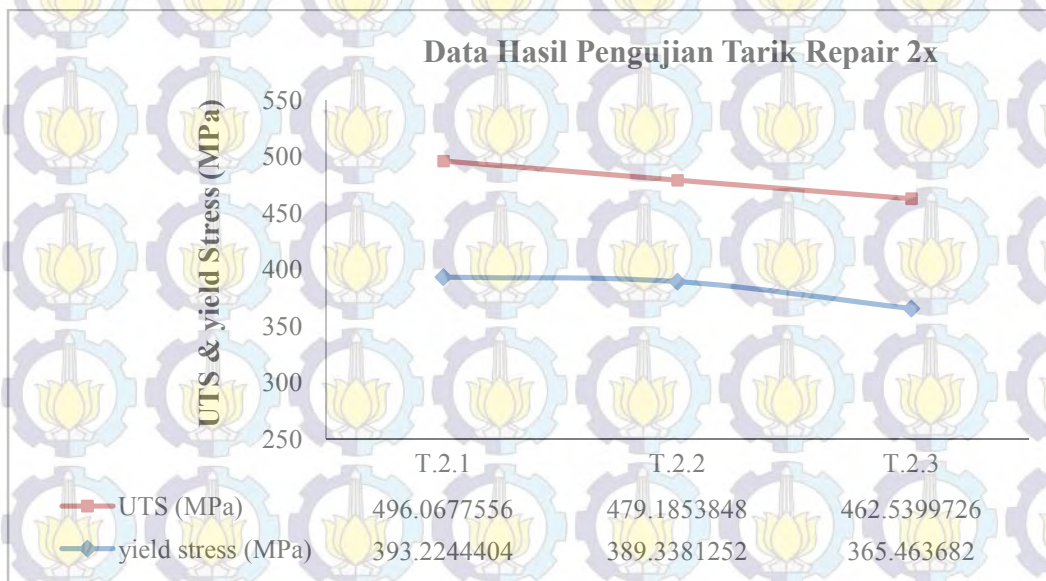
323.8516759

375.0937734

371.7817641

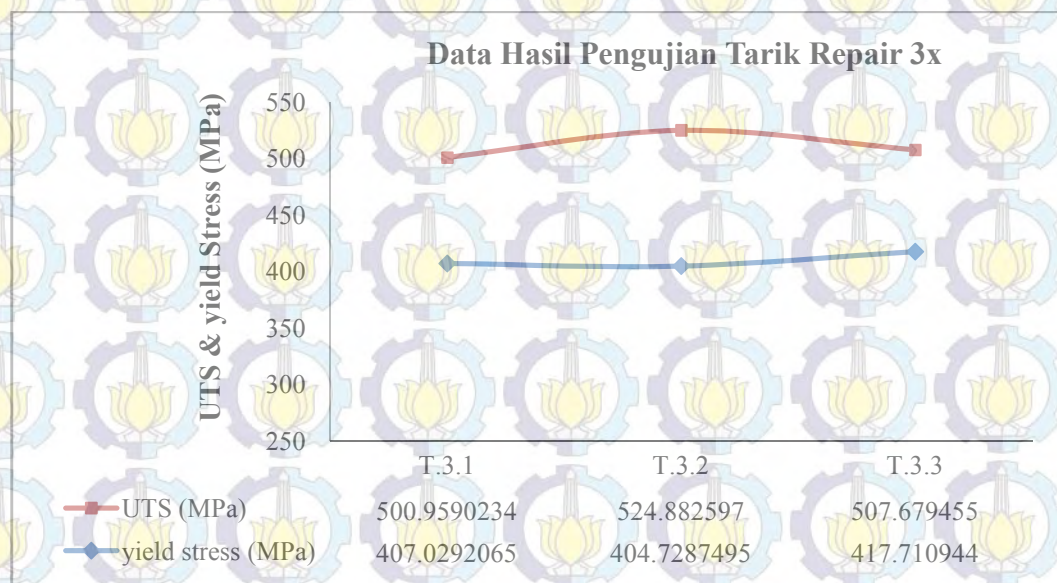
Spesimen	l_0	l_k	A_0 (mm ²)	Data Hasil Pengujian Tarik Repair 1x				l_f	l_n	A_f (mm ²)	Keterangan Tarik
				yield point (N)	Force yield (N)	yield stress (MPa)	UTS (MPa)				
T.1.1	19	8.7	165.4	65000	81000	393.2244404	496.657755	14	6.1	86.8	Logam Induk
T.1.2	18.33	9	166.95	65000	81000	380.3387357	470.1883818	14.0	7.1	93.36	Logam Induk
T.1.3	19.5	8.8	175.12	64000	81000	365.405682	462.5899725	12.7	5.8	73.66	Logam Induk
Rata-rata	19.15	8.8333	169.143	64666.66667	81000	382.675120	476.261371	13.8667	6.3333	84.2667	

Lampiran A.3 Data uji tarik material *repair 2x*



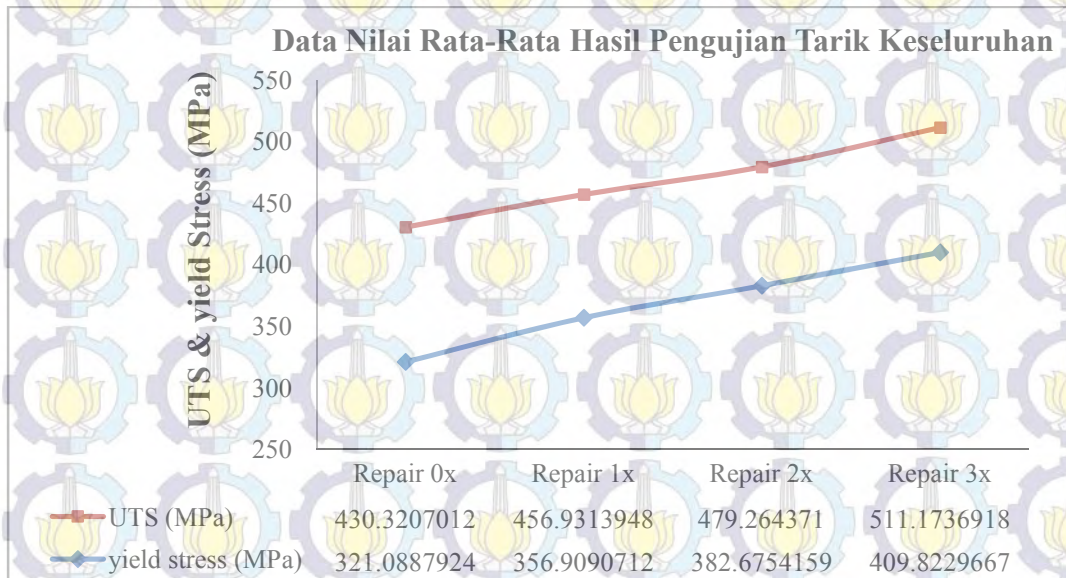
Spesimen	l_0	r_0	A_0 (mm ²)	Data Hasil Pengujian Tarik Repair 2x				l_f	l_i	A_f (mm ²)	Keterangan Patah
				yield point (N)	Force yield (N)	yield stress (MPa)	UTS (MPa)				
T.2.1	19	8	163.3	68000	82000	393.2244404	496.0677556	14	8.1	86.8	Logam tidak
T.2.2	18.5	8	166.35	68000	80000	389.3381252	479.1853848	14.0	6.1	83.10	Logam tidak
T.2.3	19.5	8.5	175.12	64000	81000	365.463682	462.5399726	12.7	5.5	73.66	Logam tidak
Rata-rata	19.15	8.166666	168.113	68000.00000	81000	382.6074159	479.161371	13.866666	6.133333	83.173333	

Lampiran A.4 Data uji tarik material *repair 3x*



Spesimen	l_0	l_f	A_0 (mm ²)	Data Hasil Pengujian Tarik Repair 3x							Keterangan Parah
				yield point (N)	Force yield (N)	yield stress (MPa)	UTS (MPa)	b_f	l_f	A_f (mm ²)	
T.3.1	19.15	8.27	139.694	61000	83000	407.0292065	500.9590234	14.93	5.85	87.1385	Logam Induk
T.3.2	18.87	8.18	138.14	61000	83000	404.7287495	524.882597	13.08	6.05	97.187	Logam Induk
T.3.3	19	8.19	135.67	65000	79000	417.710944	507.679455	14.54	5.93	85.2222	Logam Induk
Rata rata	19.00	8.28	137.83	61000.0000	80000.0000	409.8220007	511.1750918	14.18	6.01	90.17257	

Lampiran A.5 Data rata-rata uji tarik material keseluruhan



Specimen	Data Nilai Rata-Rata Hasil Pengujian Tarik Keseluruhan										Keterangan Patah
	l_0 (mm)	l_a (mm)	A_0 (mm ²)	yield point (N)	Force yield (N)	yield stress (MPa)	UTS (MPa)	l_b (mm)	l_c (mm)	A_1 (mm ²)	
Repair 0x	19.56667	9.76667	171.12	51339.53333	82166.66667	321.0887924	430.3207012	11.7	7.1	101.34	Logam Intak
Repair 1x	18.73	9	166.573	60000	77250	356.9090712	456.9313948	13.8333	6.28333	87.2117	Logam Intak
Repair 2x	19.15	8.83333	169.123	51555.55557	51075	382.6754159	479.264371	13.8667	6.13333	85.27333	Logam Intak
Repair 3x	19.06	8.12	167.511	51555.55557	80666.66667	409.8229667	511.1736918	14.85	6.07	90.17257	Logam Tatis

Lampiran B. Data dan Grafik Rata-Rata Uji Kekerasan

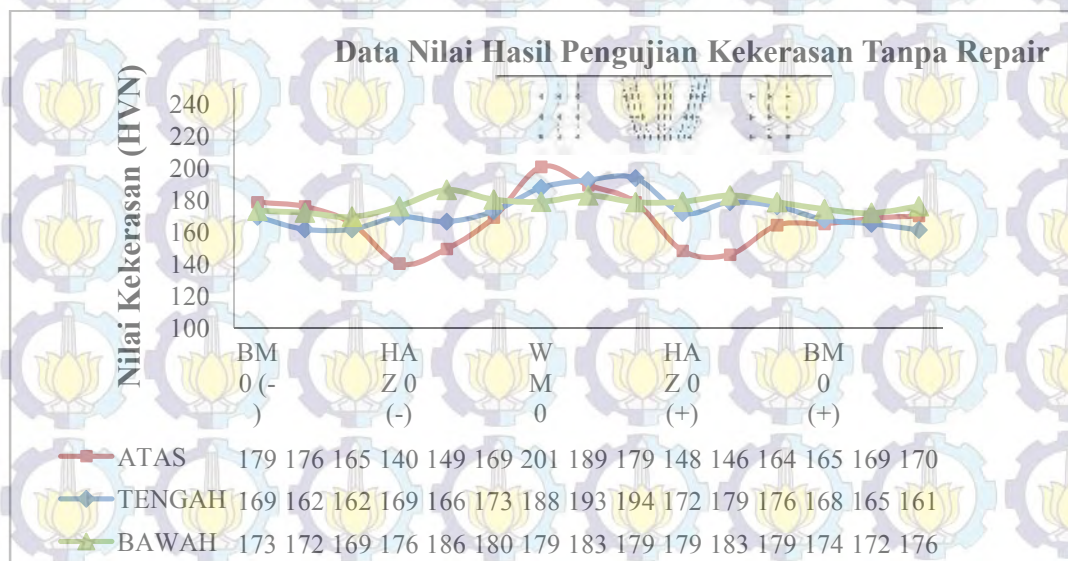
Lampiran B.1 Data uji kekerasan material tanpa *repair*

Load : 30 kgf
 Identor : Piramid intan
 Time : 15 s
 HVN : $1.854 \times (P/d^2)$



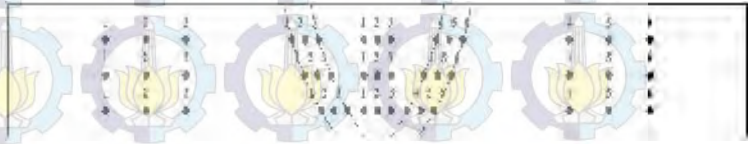
Lokasi		D1	D2	Dr	Dr ²	HVN	HVN rata-rata
Atas	1	0.482	0.573	0.528	0.278	200	174.097
	2	0.569	0.556	0.563	0.316	176	
	3	0.587	0.573	0.580	0.336	165	
	4	0.573	0.588	0.581	0.337	165	
	5	0.582	0.567	0.575	0.330	169	
	6	0.566	0.578	0.572	0.327	170	
BM (0) Tengah	1	0.573	0.573	0.573	0.328	169	164.439
	2	0.582	0.591	0.587	0.344	162	
	3	0.591	0.582	0.587	0.344	162	
	4	0.574	0.578	0.576	0.332	168	
	5	0.578	0.583	0.581	0.337	165	
	6	0.588	0.587	0.588	0.345	161	
Bawah	1	0.56	0.573	0.567	0.321	173	172.823
	2	0.564	0.573	0.569	0.323	172	
	3	0.564	0.582	0.573	0.328	169	
	4	0.579	0.551	0.565	0.319	174	
	5	0.574	0.564	0.569	0.324	172	
	6	0.573	0.551	0.562	0.316	176	
HAZ (0) Atas	1	0.687	0.573	0.630	0.397	140	152.842
	2	0.669	0.551	0.610	0.372	149	
	3	0.596	0.551	0.574	0.329	169	
	4	0.669	0.556	0.613	0.375	148	
	5	0.684	0.551	0.618	0.381	146	
	6	0.604	0.56	0.582	0.339	164	
Tengah	1	0.582	0.564	0.573	0.328	169	172.570
	2	0.578	0.578	0.578	0.334	166	
	3	0.587	0.547	0.567	0.321	173	
	4	0.578	0.56	0.569	0.324	172	

WM (0)	Bawah	5	0.547	0.569	0.558	0.311	179	180.505
		6	0.56	0.564	0.562	0.316	176	
		1	0.56	0.564	0.562	0.316	176	
		2	0.569	0.524	0.547	0.299	186	
		3	0.578	0.533	0.556	0.309	180	
		4	0.573	0.542	0.558	0.311	179	
	Atas	5	0.547	0.556	0.552	0.304	183	189.539
		6	0.569	0.547	0.558	0.311	179	
		1	0.542	0.511	0.527	0.277	201	
		2	0.551	0.533	0.542	0.294	189	
		3	0.533	0.583	0.558	0.311	179	
	Tengah	1	0.556	0.533	0.545	0.296	188	191.239
		2	0.542	0.533	0.538	0.289	193	
		3	0.556	0.516	0.536	0.287	194	
	Bawah	1	0.573	0.542	0.558	0.311	179	180.152
		2	0.547	0.556	0.552	0.304	183	
		3	0.569	0.547	0.558	0.311	179	



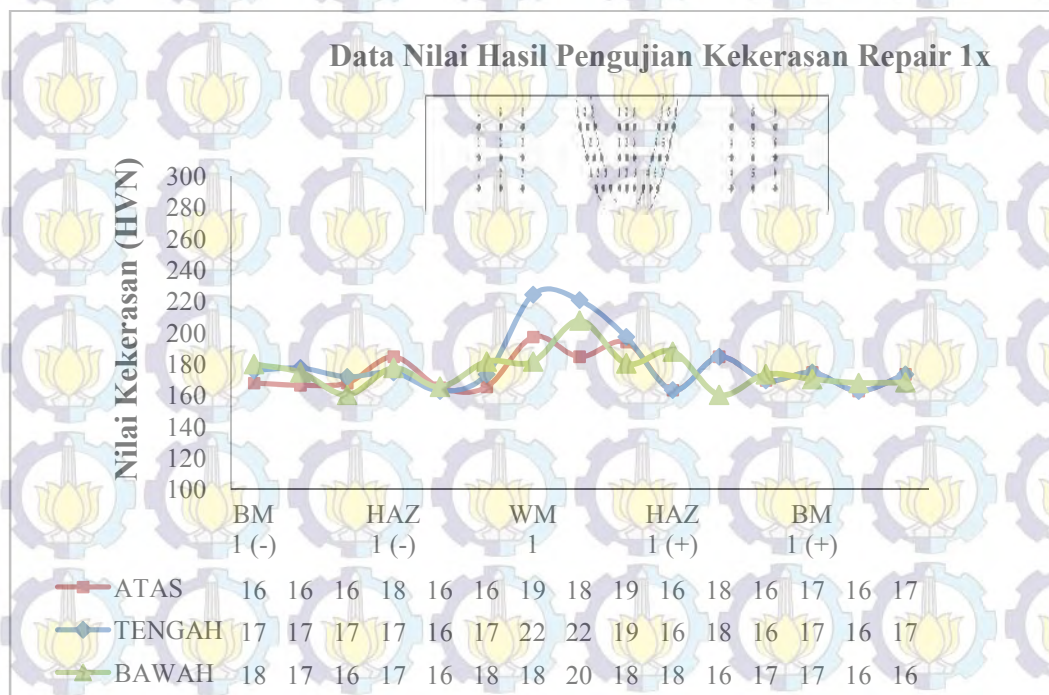
Lampiran B.2 Data uji kekerasan material *repair* 1x

Load : 30 kgf
 Identor : Piramid intan
 Time : 15 s
 HVN : $1.854 \times (P/d^2)$



Lokasi		D1	D2	Dr	Dr ²	HVN	HVN rata-rata
Atas	1	0.569	0.582	0.576	0.331	168	165.984
	2	0.596	0.56	0.578	0.334	166	
	3	0.582	0.569	0.576	0.331	168	
	4	0.578	0.573	0.576	0.331	168	
	5	0.587	0.578	0.583	0.339	164	
	6	0.591	0.582	0.587	0.344	162	
BM (1) Tengah	1	0.556	0.569	0.563	0.316	176	172.600
	2	0.564	0.556	0.560	0.314	177	
	3	0.569	0.569	0.569	0.324	172	
	4	0.573	0.556	0.565	0.319	175	
	5	0.591	0.578	0.585	0.342	163	
	6	0.564	0.569	0.567	0.321	173	
Bawah	1	0.556	0.556	0.556	0.309	180	170.207
	2	0.569	0.56	0.565	0.319	175	
	3	0.6	0.578	0.589	0.347	160	
	4	0.583	0.56	0.572	0.327	170	
	5	0.582	0.569	0.576	0.331	168	
	6	0.589	0.561	0.575	0.331	168	
HAZ (1) Atas	1	0.542	0.556	0.549	0.301	185	171.652
	2	0.583	0.578	0.581	0.337	165	
	3	0.586	0.574	0.580	0.336	165	
	4	0.559	0.564	0.562	0.315	176	
	5	0.582	0.556	0.569	0.324	172	
	6	0.571	0.584	0.578	0.334	167	
Tengah	1	0.564	0.556	0.560	0.314	177	176.848
	2	0.533	0.564	0.549	0.301	185	
	3	0.56	0.547	0.554	0.306	182	
	4	0.586	0.581	0.584	0.340	163	
	5	0.538	0.56	0.549	0.301	185	
	6	0.573	0.573	0.573	0.328	169	
Bawah	1	0.533	0.569	0.551	0.304	183	174.371

WM (1)		2	0.609	0.551	0.580	0.336	165	
		3	0.564	0.56	0.562	0.316	176	
		4	0.524	0.564	0.544	0.296	188	
		5	0.596	0.582	0.589	0.347	160	
		6	0.573	0.56	0.567	0.321	173	
	Atas	1	0.56	0.502	0.531	0.282	197	191.920
		2	0.551	0.547	0.549	0.301	185	
		3	0.542	0.529	0.536	0.287	194	
		4						
		5						
		6						
	Tengah	1	0.467	0.529	0.498	0.248	224	214.081
		2	0.493	0.511	0.502	0.252	221	
		3	0.538	0.524	0.531	0.282	197	
		4						
		5						
		6						
	Bawah	1	0.547	0.56	0.554	0.306	182	189.827
		2	0.524	0.511	0.518	0.268	208	
		3	0.573	0.538	0.556	0.309	180	
		4						
		5						
		6						



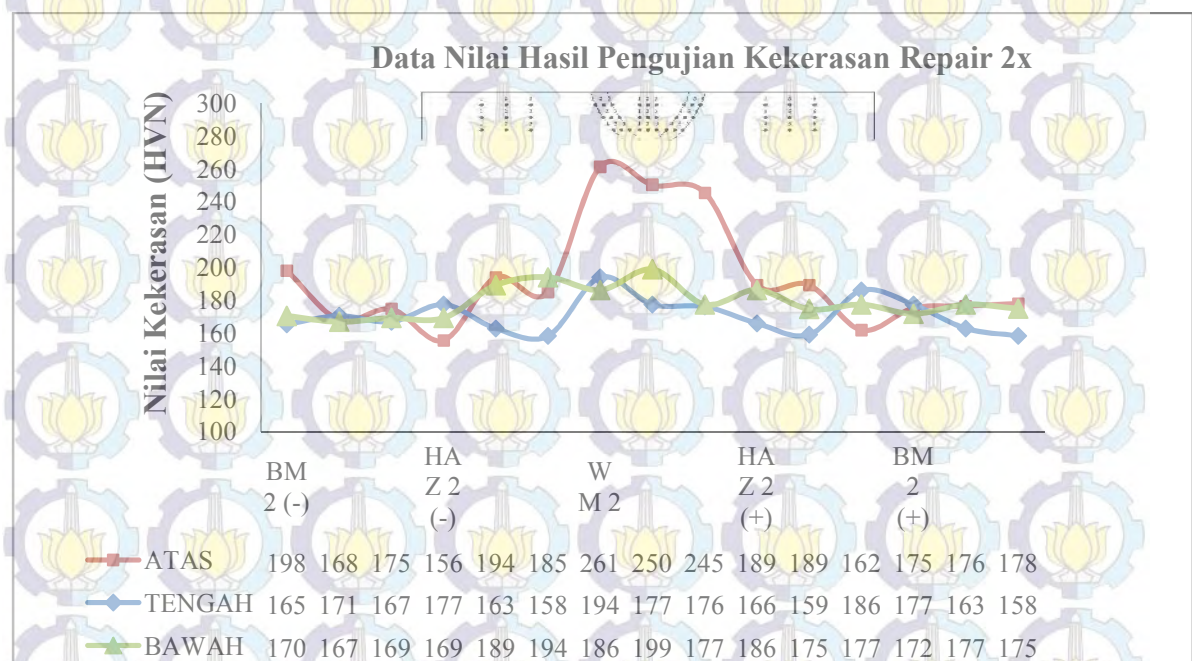
Lampiran B.3 Data uji kekerasan material *repair 2x*

Load : 30 kgf
 Identor : Piramid intan
 Time : 15 s
 HVN : $1.854 \times (P/d^2)$



Lokasi			D1	D2	Dr	Dr ²	HVN	HVN rata-rata
BM (2)	Atas	1	0.504	0.556	0.530	0.281	198	178.343
		2	0.573	0.578	0.576	0.331	168	
		3	0.556	0.573	0.565	0.319	175	
		4	0.549	0.578	0.564	0.318	175	
		5	0.541	0.582	0.562	0.315	176	
		6	0.531	0.587	0.559	0.312	178	
BM (2)	Tengah	1	0.6	0.56	0.580	0.336	165	166.839
		2	0.573	0.569	0.571	0.326	171	
		3	0.591	0.564	0.578	0.334	167	
		4	0.569	0.551	0.560	0.314	177	
		5	0.582	0.587	0.585	0.342	163	
		6	0.582	0.604	0.593	0.352	158	
BM (2)	Bawah	1	0.556	0.587	0.572	0.327	170	171.697
		2	0.582	0.573	0.578	0.334	167	
		3	0.591	0.556	0.574	0.329	169	
		4	0.538	0.6	0.569	0.324	172	
		5	0.538	0.582	0.560	0.314	177	
		6	0.564	0.564	0.564	0.318	175	
HAZ (2)	Atas	1	0.609	0.587	0.598	0.358	156	179.123
		2	0.529	0.542	0.536	0.287	194	
		3	0.564	0.533	0.549	0.301	185	
		4	0.542	0.542	0.542	0.294	189	
		5	0.564	0.52	0.542	0.294	189	
		6	0.6	0.573	0.587	0.344	162	
HAZ (2)	Tengah	1	0.538	0.538	0.538	0.289	192	179.920
		2	0.538	0.547	0.543	0.294	189	
		3	0.556	0.533	0.545	0.296	188	
		4	0.629	0.529	0.579	0.335	166	
		5	0.659	0.524	0.592	0.350	159	
		6	0.565	0.529	0.547	0.299	186	
	Bawah	1	0.591	0.556	0.574	0.329	169	181.698

WM (2)		2	0.529	0.556	0.543	0.294	189	
		3	0.529	0.542	0.536	0.287	194	
		4	0.551	0.542	0.547	0.299	186	
		5	0.556	0.573	0.565	0.319	175	
		6	0.556	0.564	0.560	0.314	177	
	Atas	1	0.466	0.457	0.462	0.213	261	252.273
		2	0.476	0.467	0.472	0.222	250	
		3	0.473	0.479	0.476	0.227	245	
		4						
		5						
		6						
	Tengah	1	0.551	0.52	0.536	0.287	194	182.473
		2	0.56	0.56	0.560	0.314	177	
		3	0.573	0.551	0.562	0.316	176	
		4						
		5						
		6						
	Bawah	1	0.529	0.564	0.547	0.299	186	187.449
		2	0.538	0.52	0.529	0.280	199	
		3	0.556	0.564	0.560	0.314	177	
		4						
		5						
		6						



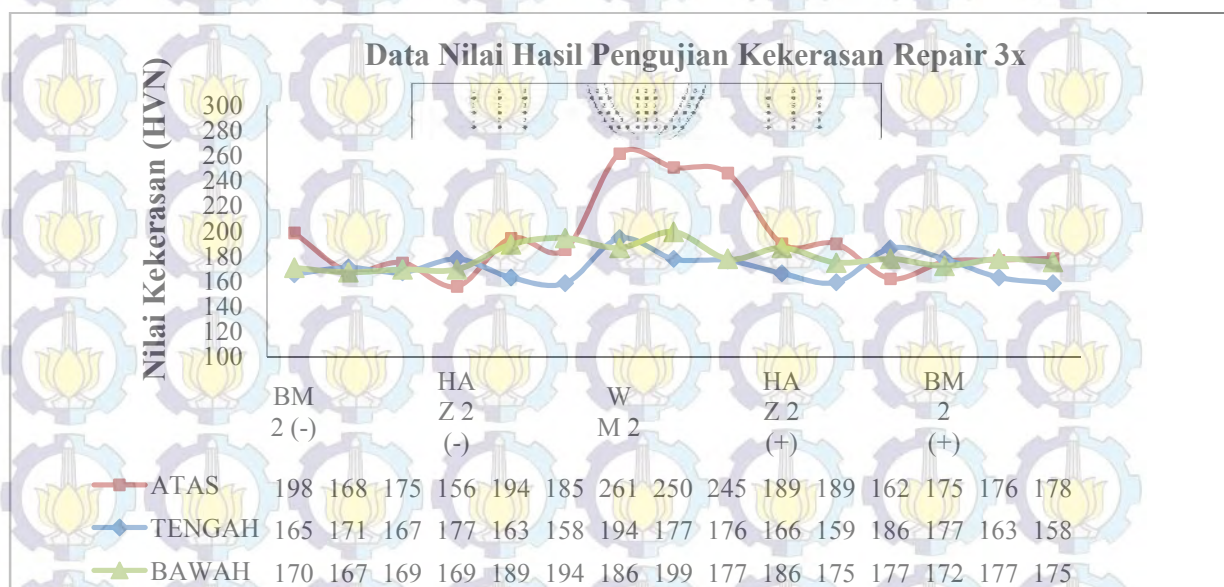
Lampiran B.4 Data uji kekerasan material *repair* 3x

Load : 30 kgf
 Identor : Piramid intan
 Time : 15 s
 HVN : $1.854 \times (P/d^2)$



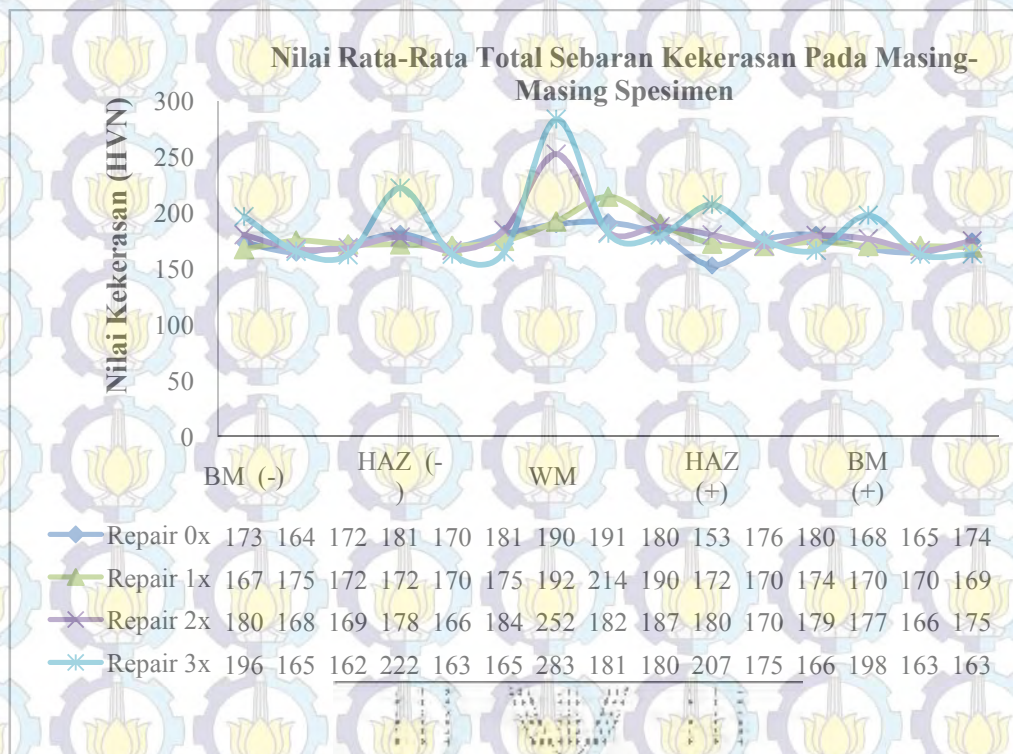
Lokasi		D1	D2	Dr	Dr ²	HVN	HVN rata-rata
Atas	1	0.468	0.583	0.526	0.276	201	197.010
	2	0.498	0.582	0.540	0.292	191	
	3	0.486	0.576	0.531	0.282	197	
	4	0.485	0.587	0.536	0.287	194	
	5	0.456	0.581	0.519	0.269	207	
	6	0.483	0.593	0.538	0.289	192	
BM (3) Tengah	1	0.587	0.591	0.589	0.347	160	164.023
	2	0.587	0.564	0.576	0.331	168	
	3	0.582	0.569	0.576	0.331	168	
	4	0.587	0.604	0.596	0.355	157	
	5	0.582	0.564	0.573	0.328	169	
	6	0.569	0.604	0.587	0.344	162	
Bawah	1	0.582	0.569	0.576	0.331	168	162.517
	2	0.604	0.582	0.593	0.352	158	
	3	0.591	0.587	0.589	0.347	160	
	4	0.591	0.591	0.591	0.349	159	
	5	0.587	0.56	0.574	0.329	169	
	6	0.578	0.6	0.589	0.347	160	
HAZ (3) Atas	1	0.464	0.52	0.492	0.242	230	214.480
	2	0.478	0.511	0.495	0.245	227	
	3	0.509	0.524	0.517	0.267	208	
	4	0.488	0.538	0.513	0.263	211	
	5	0.478	0.564	0.521	0.271	205	
	6	0.5	0.542	0.521	0.271	205	
HAZ (3) Tengah	1	0.596	0.613	0.605	0.365	152	175.720
	2	0.504	0.6	0.552	0.305	183	
	3	0.509	0.564	0.537	0.288	193	
	4	0.596	0.547	0.572	0.327	170	
	5	0.504	0.569	0.537	0.288	193	
	6	0.578	0.591	0.585	0.342	163	
HAZ (3) Bawah	1	0.591	0.596	0.594	0.352	158	165.323

WM (3)		2	0.596	0.551	0.574	0.329	169	
		3	0.613	0.542	0.578	0.334	167	
		4	0.6	0.529	0.565	0.319	175	
		5	0.596	0.551	0.574	0.329	169	
		6	0.627	0.573	0.600	0.360	155	
	Atas	1	0.456	0.458	0.457	0.209	266	283.263
		2	0.469	0.416	0.443	0.196	284	
		3	0.433	0.429	0.431	0.186	299	
		4						
		5						
		6						
	Tengah	1	0.587	0.542	0.565	0.319	175	181.413
		2	0.547	0.533	0.540	0.292	191	
		3	0.573	0.542	0.558	0.311	179	
		4						
		5						
		6						
	Bawah	1	0.582	0.542	0.562	0.316	176	179.933
		2	0.547	0.542	0.545	0.296	188	
		3	0.564	0.56	0.562	0.316	176	
		4						
		5						
		6						



Lampiran B.5 Data uji kekerasan material keseluruhan

Lokasi	BM (-)				HAZ (-)				WM				HAZ (+)				DM (+)	
Repair 0x	173	161	172	181	170	181	190	191	180	153	176	180	168	165	174			
Repair 1x	167	175	172	172	170	175	192	214	190	172	170	174	170	170	169			
Repair 2x	180	168	169	178	166	184	252	182	187	180	170	179	177	166	175			
Repair 3x	196	165	162	222	163	165	283	181	180	207	175	166	198	163	163			

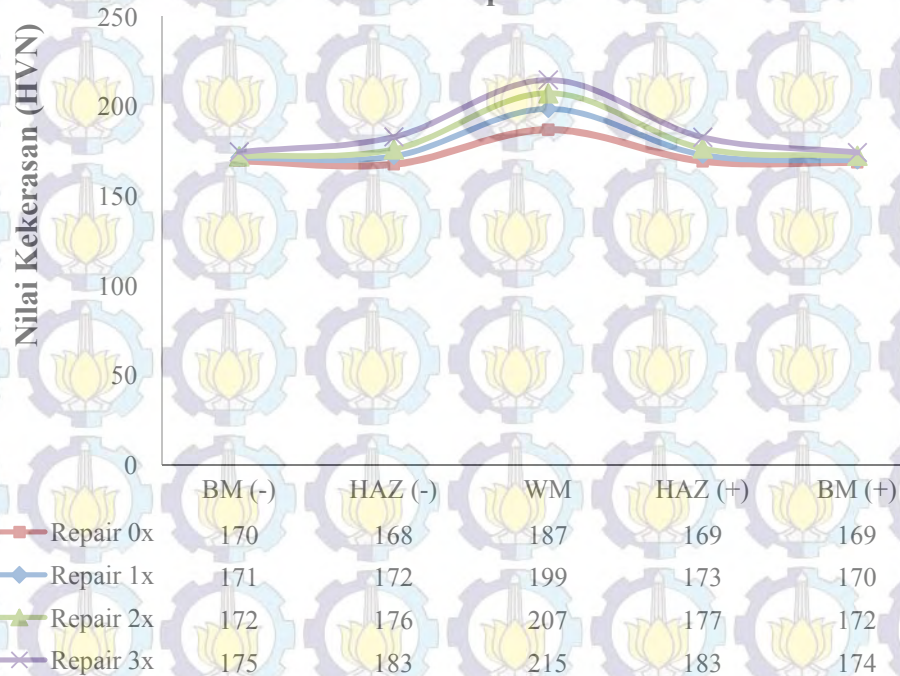


Lampiran B.6 Data rata-rata total uji kekerasan material keseluruhan

Nilai Rata-Rata Total Kekerasan Pada Masing-Masing Spesimen

Lokasi	BM (-)	HAZ (-)	WM	HAZ (+)	BM (+)
Repair 0x	170	168	187	169	169
Repair 1x	171	172	199	173	170
Repair 2x	172	176	207	177	172
Repair 3x	175	183	215	183	174

Nilai Rata-Rata Total Kekerasan Pada Masing-Masing Spesimen



Lampiran C. Data dan Grafik Rata-Rata Hasil Uji Tegangan Sisa

Lampiran C.1 Data rata-rata uji tegangan sisa material keseluruhan

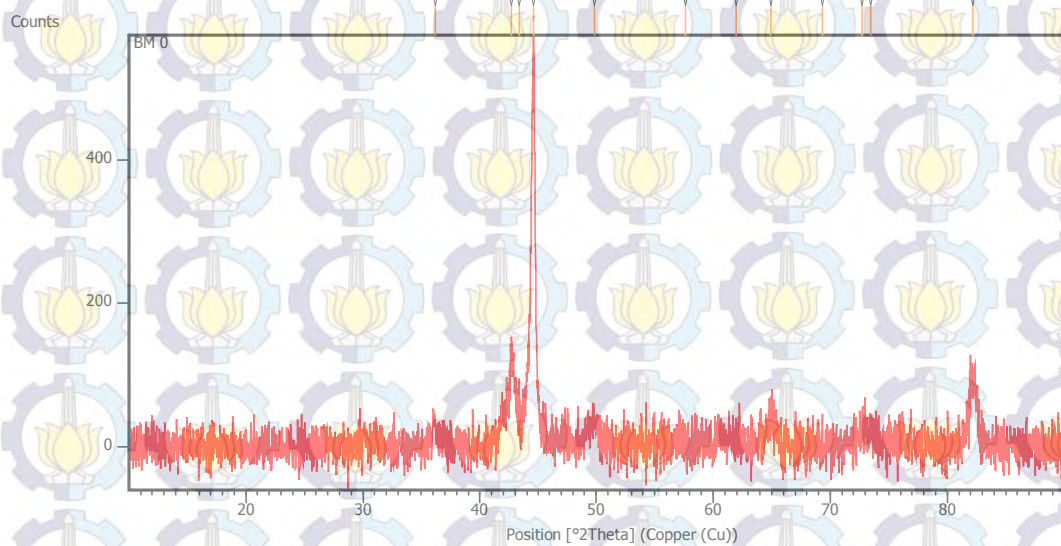
Variabel	Posisi	FWHM SI		FWHM SAMOS		B	Pos		E	MPa	MPa
		(μ)	Rad	(μ)	Rad		(°2 θ)	Theta (°)			
Tanpa Repair	Base metal	0.0734	0.001281072	0.0669	0.0011878	0.00052705	44.8015	22.30075	0.032128638	200000	6425.33
	HAZ	0.0734	0.001281072	0.0806	0.0014067	0.00058117	44.5345	22.26728	0.035483795	200000	7096.76
	Weld metal	0.0734	0.001281072	0.0835	0.0014573	0.00069478	44.5445	22.27225	0.042409929	200000	8481.99
Repair 1x	Base metal	0.0734	0.001281072	0.0836	0.0014391	0.00069844	44.4936	22.2468	0.042588993	200000	8537.40
	HAZ	0.0734	0.001281072	0.0836	0.0014391	0.00069844	44.5301	22.26503	0.042648221	200000	8529.64
	Weld metal	0.0734	0.001281072	0.0895	0.0015621	0.00089382	44.4847	22.24233	0.054640592	200000	10928.12
Repair 2x	Base metal	0.0734	0.001281072	0.0836	0.0014391	0.00069844	44.5121	22.25609	0.042667534	200000	8533.47
	HAZ	0.0734	0.001281072	0.0836	0.0014391	0.00069844	44.4247	22.21285	0.042780346	200000	8552.07
	Weld metal	0.0734	0.001281072	0.1004	0.0017523	0.0011956	44.4843	22.24215	0.073089166	200000	14617.83
Repair 3x	Base metal	0.0734	0.001281072	0.1004	0.0017523	0.0011956	44.5265	22.26325	0.07301241	200000	14602.48
	HAZ	0.0734	0.001281072	0.0946	0.0016511	0.0010416	44.6277	22.31355	0.063448238	200000	12689.65
	Weld metal	0.0734	0.001281072	0.1304	0.0022738	0.00188117	44.5577	22.27885	0.114786886	200000	22957.38

Grafik Nilai Rata-Rata Tegangan Sisa



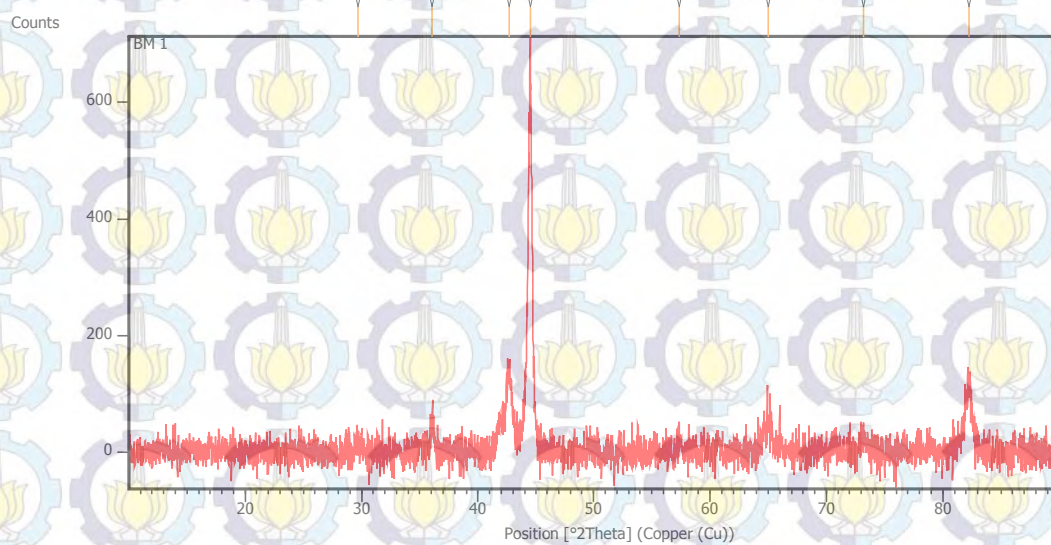
Lampiran D. Hasil Pengujian XRD

Lampiran D.1 Material *base metal* tanpa *repair*



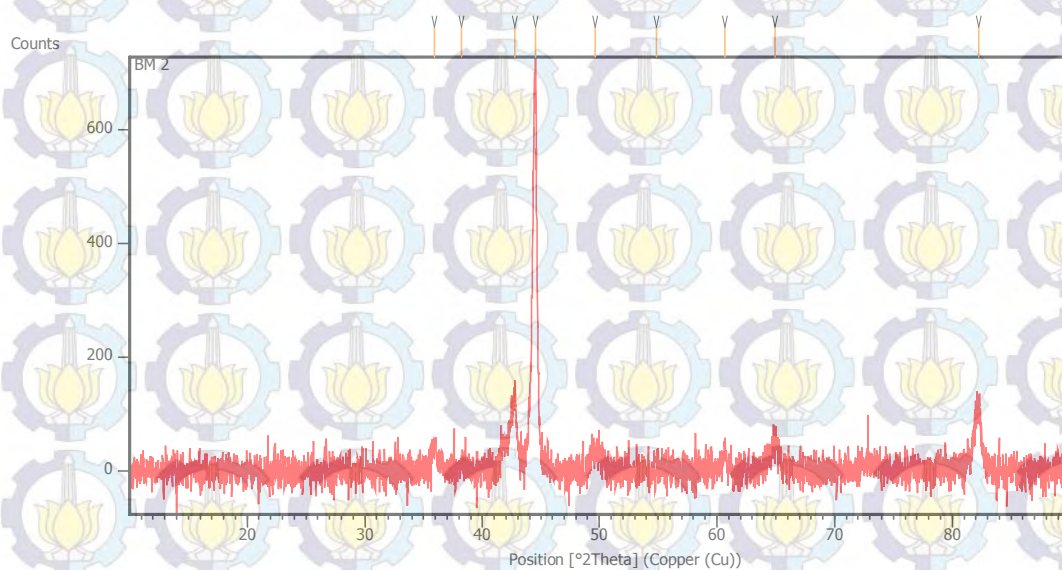
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
36.1824	27.81	0.8029	2.48264	5.19
42.7081	122.24	0.4015	2.11720	22.82
43.3613	68.67	0.1004	2.08681	12.82
44.6015	535.68	0.0669	2.03163	100.00
49.8168	37.38	0.5353	1.83047	6.98
57.6223	10.87	0.1004	1.59971	2.03
61.9764	33.62	0.1171	1.49737	6.28
64.9572	46.88	0.5353	1.43568	8.75
69.3136	33.51	0.1004	1.35571	6.26
72.7393	47.28	0.1004	1.30008	8.83
73.4638	31.16	0.2007	1.28904	5.82
82.2125	94.00	0.5353	1.17260	17.55

Lampiran D.2 Material *base metal repair* 1x



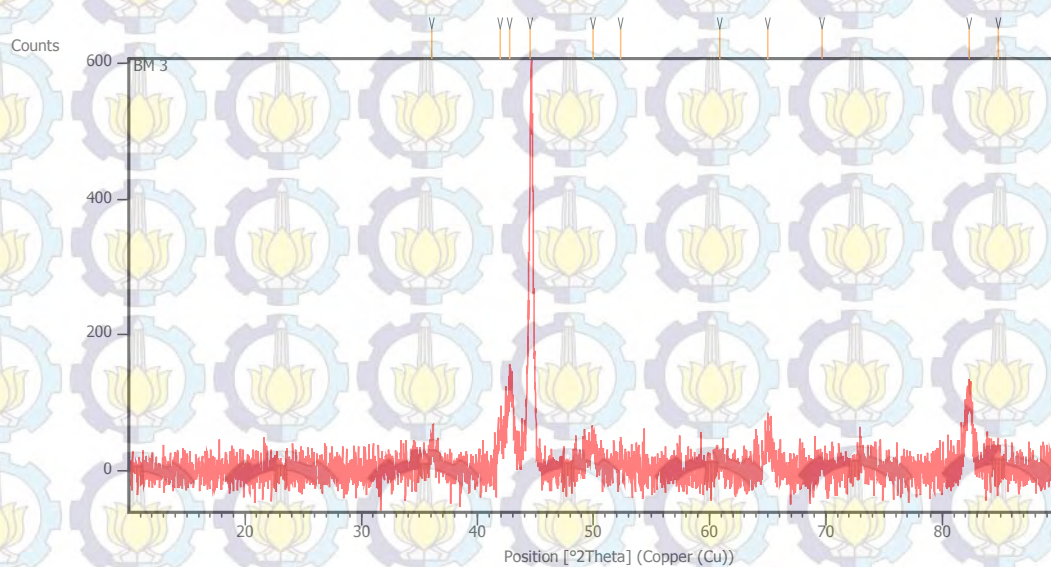
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
29.7102	17.61	0.6691	3.00707	2.63
36.0620	56.73	0.2007	2.49065	8.48
42.6607	134.12	0.4015	2.11944	20.05
44.4936	668.93	0.0836	2.03630	100.00
57.3664	19.15	0.4015	1.60623	2.86
64.9932	49.35	0.8029	1.43497	7.38
73.1866	27.17	0.4015	1.29323	4.06
82.2318	121.49	0.4015	1.17238	18.16

Lampiran D.3 Material *base metal repair 2x*



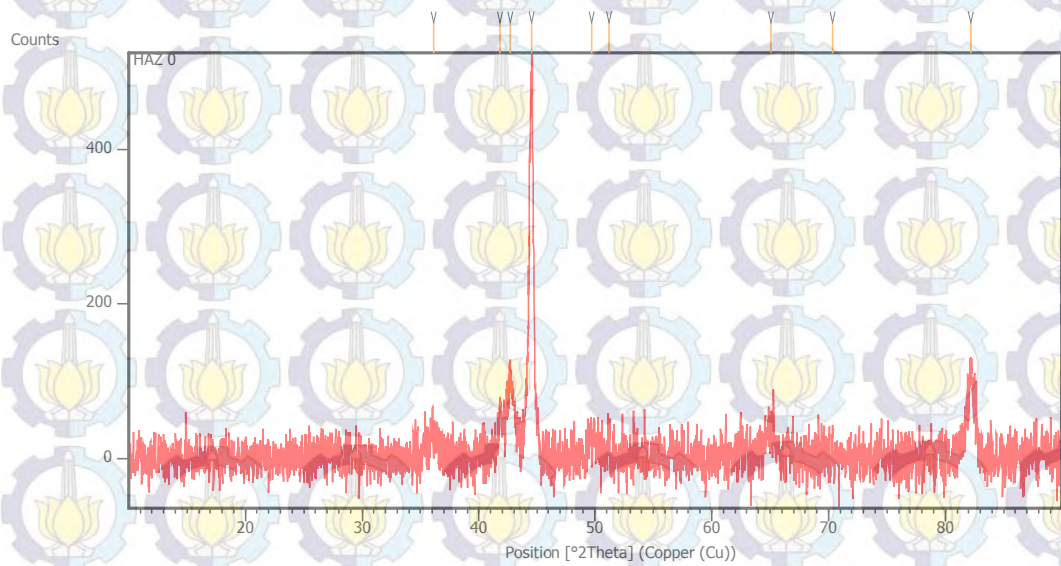
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
35.9160	42.73	0.3346	2.50044	6.05
38.2402	20.18	0.5353	2.35365	2.86
42.7382	143.08	0.1673	2.11578	20.27
44.5121	705.77	0.0836	2.03550	100.00
49.6530	32.72	0.8029	1.83612	4.64
54.8829	26.18	0.1004	1.67289	3.71
60.6495	38.12	0.5353	1.52691	5.40
64.9639	48.51	0.5353	1.43555	6.87
82.2682	131.88	0.1673	1.17195	18.69

Lampiran D.4 Material *base metal repair 3x*



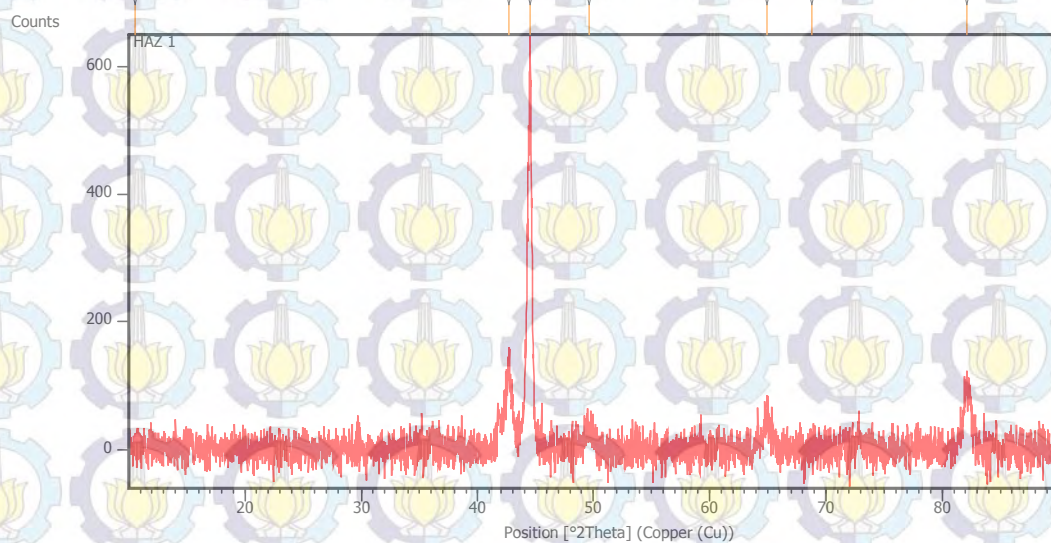
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
36.0847	36.91	0.4015	2.48914	7.43
41.9278	54.29	0.2676	2.15478	10.93
42.7671	143.90	0.1673	2.11442	28.98
44.5265	496.55	0.1004	2.03487	100.00
49.9671	40.77	0.2676	1.82532	8.21
52.3772	21.96	0.1338	1.74686	4.42
60.8898	12.36	0.8029	1.52146	2.49
65.0258	51.12	0.5353	1.43433	10.30
69.6608	10.90	0.8029	1.34980	2.19
82.3187	109.92	0.2676	1.17136	22.14
84.8071	39.72	0.0612	1.14229	8.00

Lampiran D.5 Material HAZ tanpa *repair*



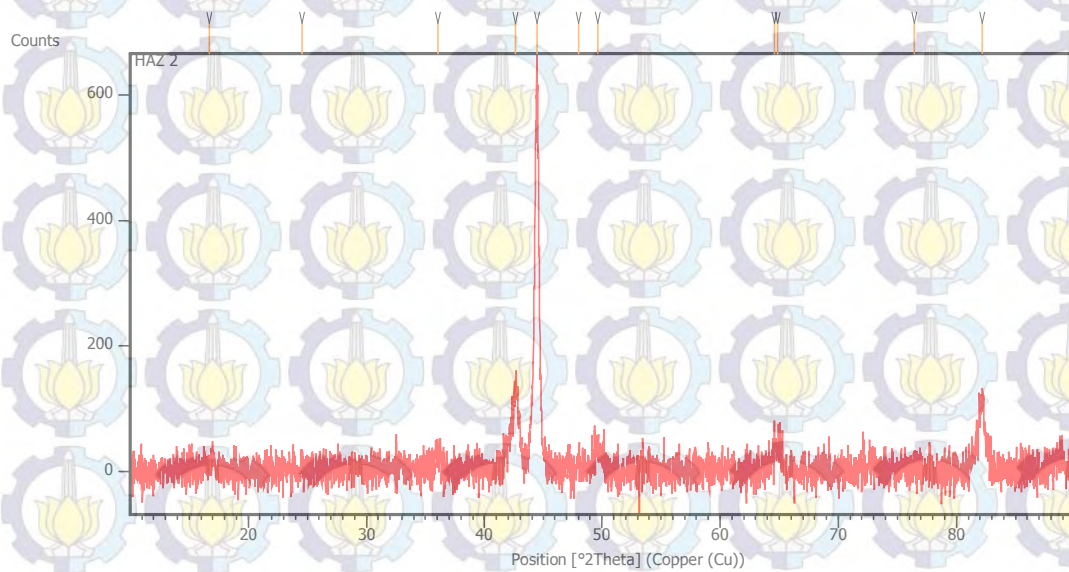
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
36.0952	36.93	0.4015	2.48844	7.05
41.8250	67.57	0.1673	2.15984	12.89
42.6906	107.28	0.4684	2.11803	20.46
44.5345	524.20	0.0806	2.03453	100.00
49.7328	24.45	0.6691	1.83337	4.66
51.1908	24.19	0.1673	1.78452	4.61
65.0547	35.20	0.8029	1.43376	6.71
70.3358	32.07	0.1338	1.33849	6.12
82.2056	124.38	0.2007	1.17268	23.73

Lampiran D.6 Material HAZ repair 1x



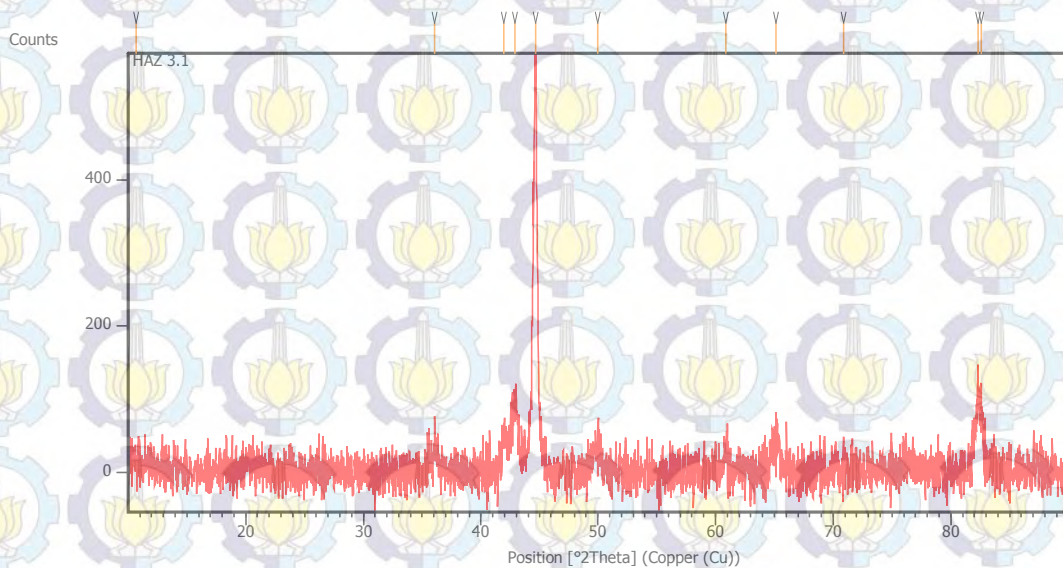
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
10.5524	5.74	0.5353	8.38371	0.92
42.6872	139.33	0.1338	2.11819	22.33
44.5301	623.89	0.0836	2.03472	100.00
49.6454	31.27	0.8029	1.83639	5.01
64.9439	45.76	0.6691	1.43594	7.33
68.7717	21.89	0.1004	1.36506	3.51
82.1140	100.35	0.3346	1.17376	16.08

Lampiran D.7 Material HAZ *repair 2x*



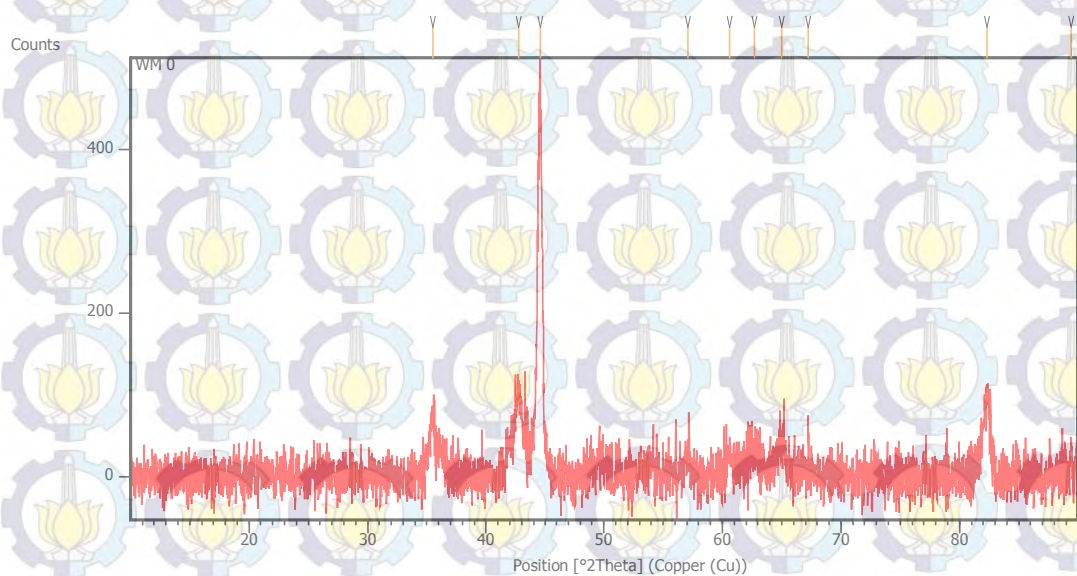
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
16.6989	14.04	0.8029	5.30912	2.09
24.5376	5.33	0.2007	3.62797	0.80
36.0544	29.61	0.4015	2.49116	4.42
42.6380	131.19	0.4015	2.12052	19.58
44.4247	670.08	0.0836	2.03930	100.00
48.0143	14.13	0.2007	1.89489	2.11
49.6270	39.82	0.9368	1.83703	5.94
64.6076	80.21	0.0612	1.44141	11.97
64.8721	41.93	0.5353	1.43735	6.26
76.4264	26.17	0.1673	1.24628	3.91
82.1646	110.82	0.2007	1.17317	16.54

Lampiran D.8 Material HAZ repair 3x



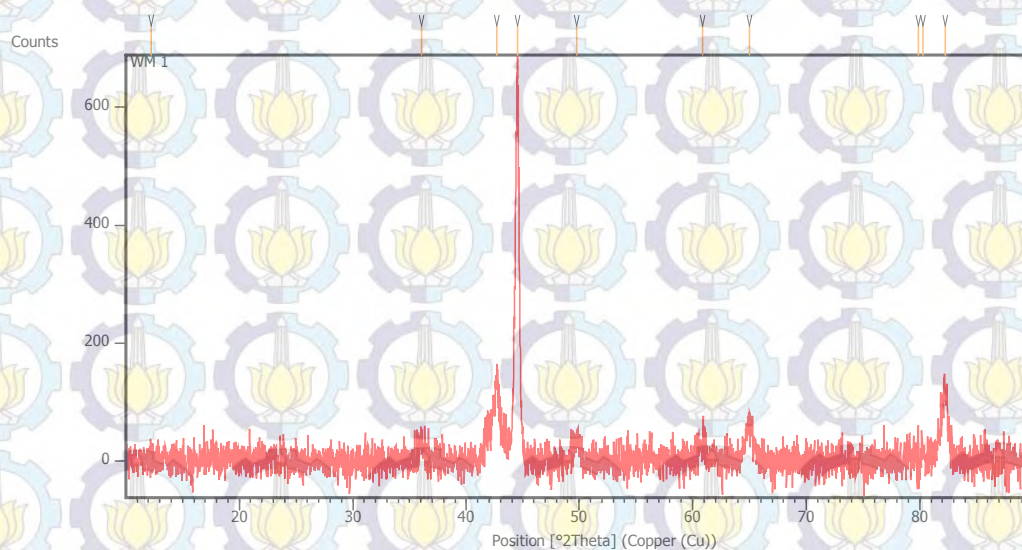
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
10.6623	4.78	0.5353	8.29751	0.87
36.0419	26.25	0.8029	2.49200	4.77
41.9621	50.82	0.2676	2.15310	9.24
42.9087	101.70	0.2007	2.10777	18.50
44.6277	549.81	0.0946	2.03049	100.00
49.9575	32.84	0.5353	1.82565	5.97
60.8796	37.89	0.4015	1.52169	6.89
65.1547	39.21	0.8029	1.43180	7.13
70.8800	47.31	0.0612	1.32844	8.61
82.3210	117.09	0.2448	1.17036	21.30
82.5590	87.16	0.2676	1.16856	15.85

Lampiran D.9 Material *weld metal* tanpa *repair*



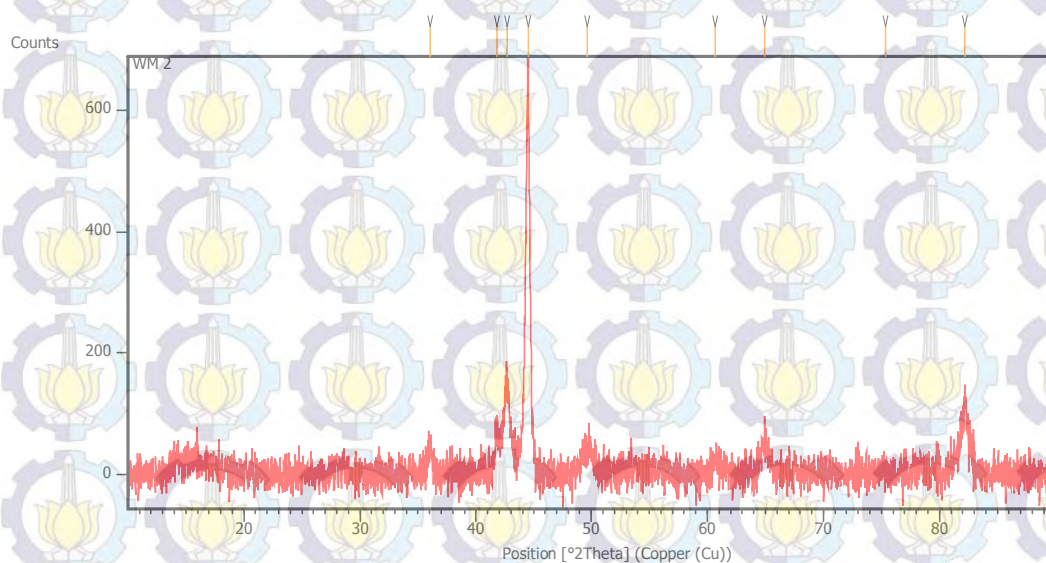
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
35.5161	75.68	0.2007	2.52768	15.61
42.7482	103.86	0.4684	2.11531	21.41
44.5445	485.00	0.0835	2.03409	100.00
57.1006	26.21	0.8029	1.61308	5.40
60.5913	36.25	0.4015	1.52824	7.47
62.7123	33.13	0.8029	1.48156	6.83
64.9805	41.13	0.6691	1.43522	8.48
67.2652	46.02	0.0612	1.39077	9.49
82.3330	104.20	0.4015	1.17119	21.48
89.4039	23.56	0.1673	1.09599	4.86

Lampiran D.10 Material *weld metal repair 1x*



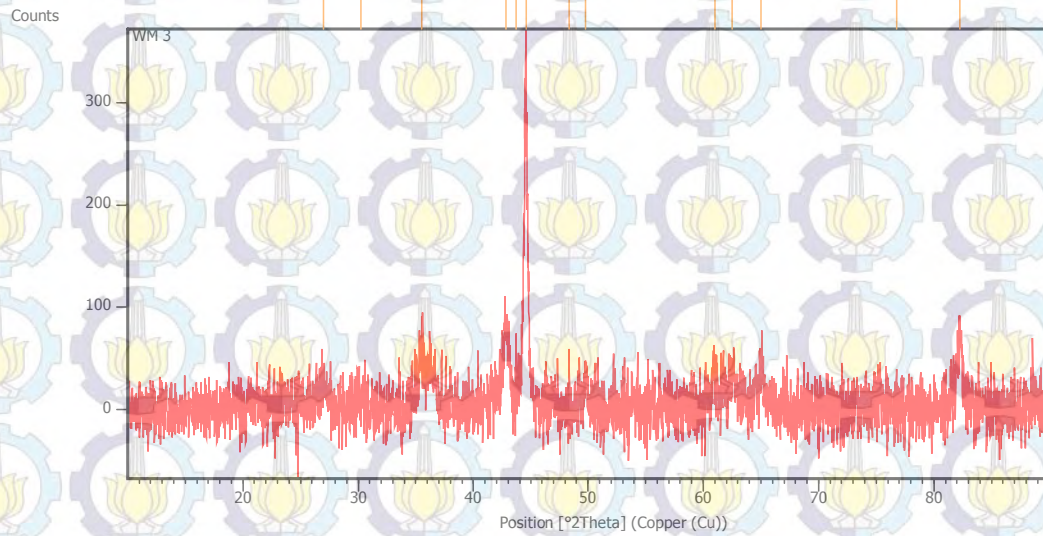
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
12.2172	17.95	0.0836	7.24476	2.76
36.0270	31.33	0.4015	2.49300	4.82
42.6714	146.80	0.2676	2.11894	22.60
44.4847	649.56	0.0895	2.03669	100.00
49.8123	36.41	0.8029	1.83063	5.60
60.8556	25.67	0.8029	1.52223	3.95
64.9784	58.64	0.8029	1.43526	9.03
79.8520	45.82	0.0816	1.20022	7.05
80.2751	24.88	0.2007	1.19595	3.83
82.2363	121.11	0.2676	1.17233	18.64

Lampiran D.11 Material *weld metal repair 2x*



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
36.0608	44.79	0.2676	2.49074	6.79
41.8165	89.29	0.2342	2.16026	13.53
42.6567	158.68	0.3346	2.11964	24.05
44.4843	659.76	0.1004	2.03670	100.00
49.6648	38.71	0.9368	1.83572	5.87
60.6651	23.15	0.6691	1.52655	3.51
64.9390	49.52	0.9368	1.43604	7.51
75.3672	19.46	0.1004	1.26114	2.95
82.2045	132.02	0.2676	1.17270	20.01

Lampiran D.12 Material *weld metal repair 3x*



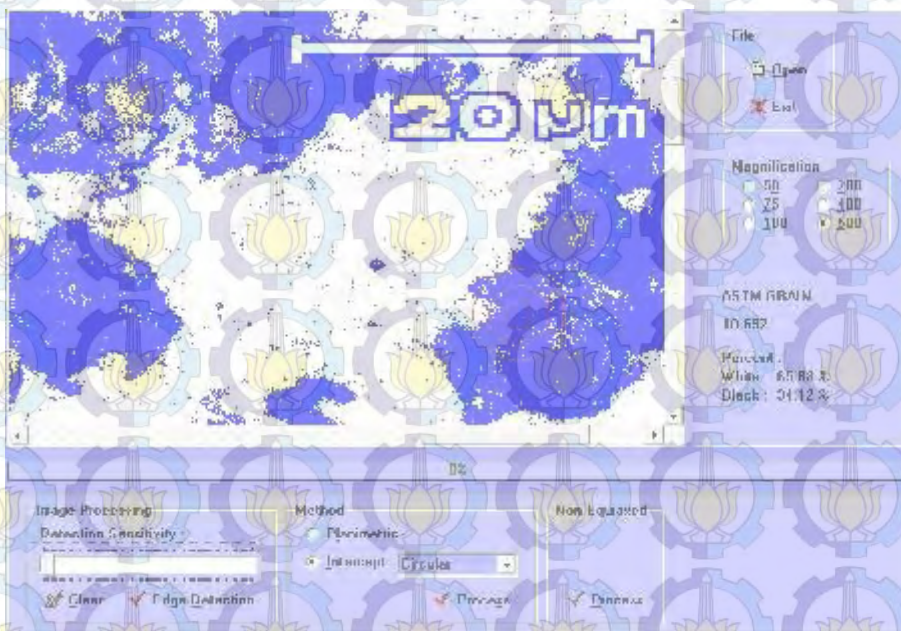
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
27.0006	20.46	0.8029	3.30236	5.57
30.2424	8.06	0.8029	2.95535	2.19
35.4932	50.92	0.3346	2.52926	13.85
42.8290	80.77	0.5353	2.11151	21.97
43.6808	62.34	0.0669	2.07229	16.96
44.5577	367.64	0.1304	2.03352	100.00
48.3931	39.58	0.0612	1.87938	10.77
49.8069	38.12	0.2007	1.83081	10.37
60.9971	31.82	0.2676	1.51904	8.65
62.5279	34.46	0.4015	1.48548	9.37
65.0296	38.29	0.3346	1.43426	10.41
76.7426	13.97	0.1673	1.24193	3.80
82.2824	74.45	0.2676	1.17178	20.25

Lampiran E. Hasil Olahan Gambar Struktur Mikro

Lampiran E.1 Hasil olahan gambar struktur mikro pada *base metal* tanpa *repair*



Lampiran E.2 Hasil olahan gambar struktur mikro pada *base metal repair 1x*



Lampiran E.3 Hasil olahan gambar struktur mikro pada *base metal repair 2x*



Lampiran E.4 Hasil olahan gambar struktur mikro pada *base metal repair 3x*



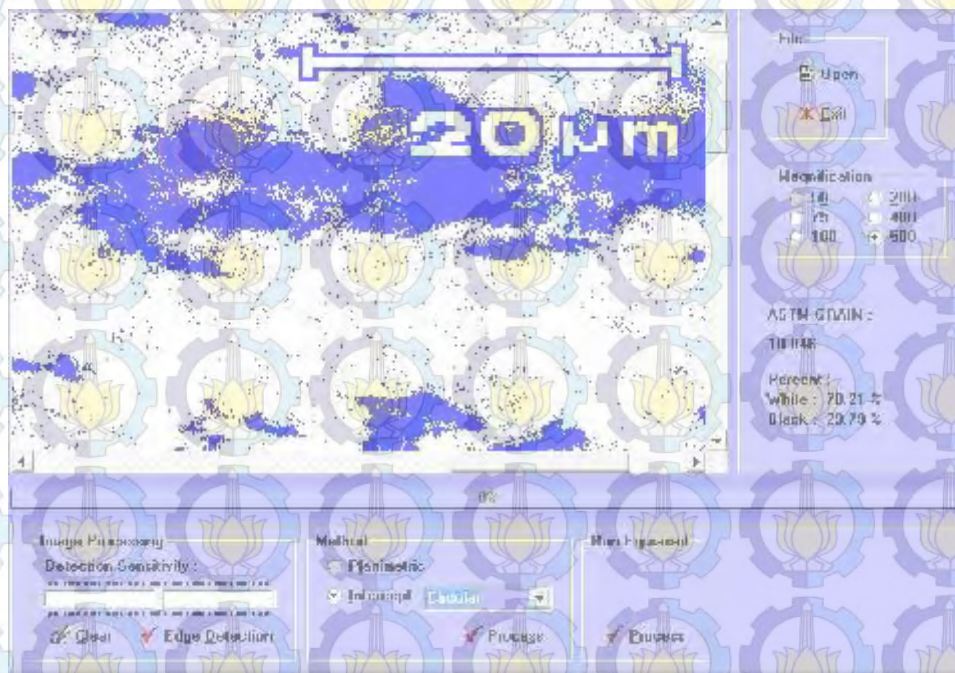
Lampiran E.5 Hasil olahan gambar struktur mikro pada HAZ tanpa *repair*



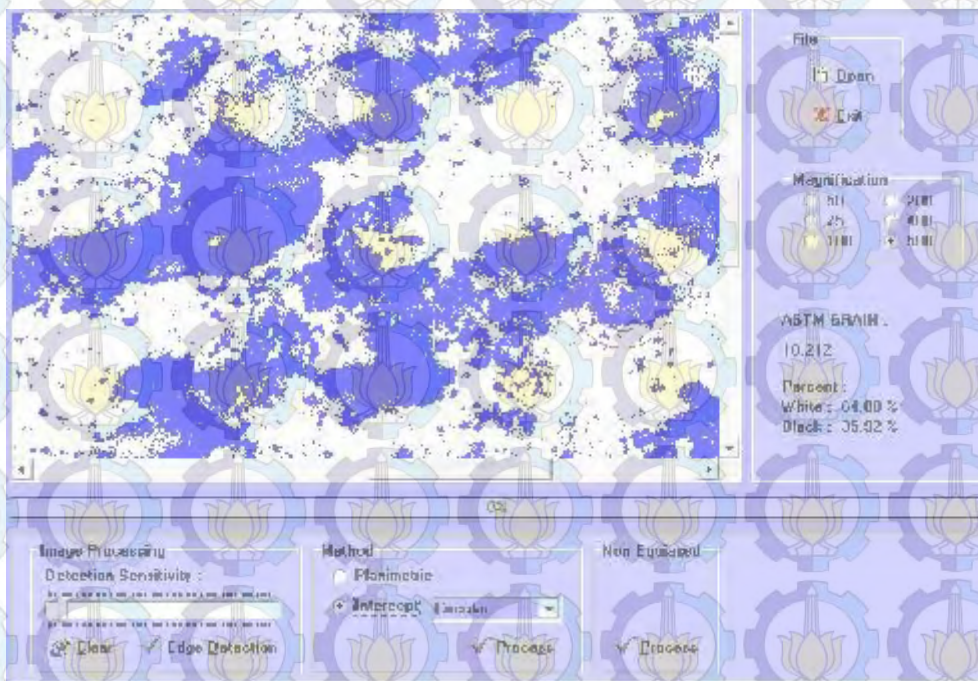
Lampiran E.6 Hasil olahan gambar struktur mikro pada HAZ *repair* 1X



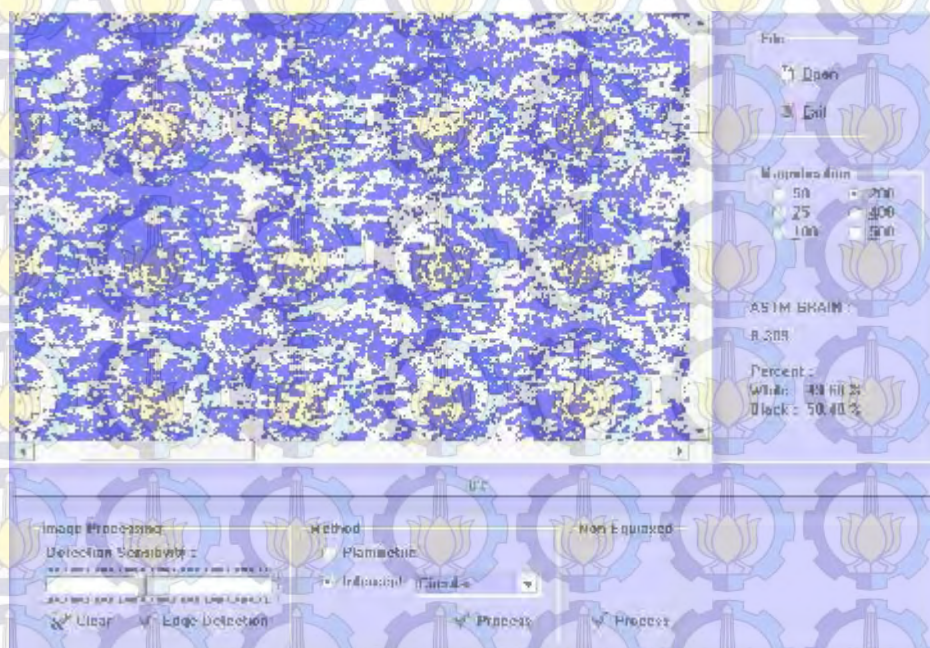
Lampiran E.7 Hasil olahan gambar struktur mikro pada HAZ *repair* 2X



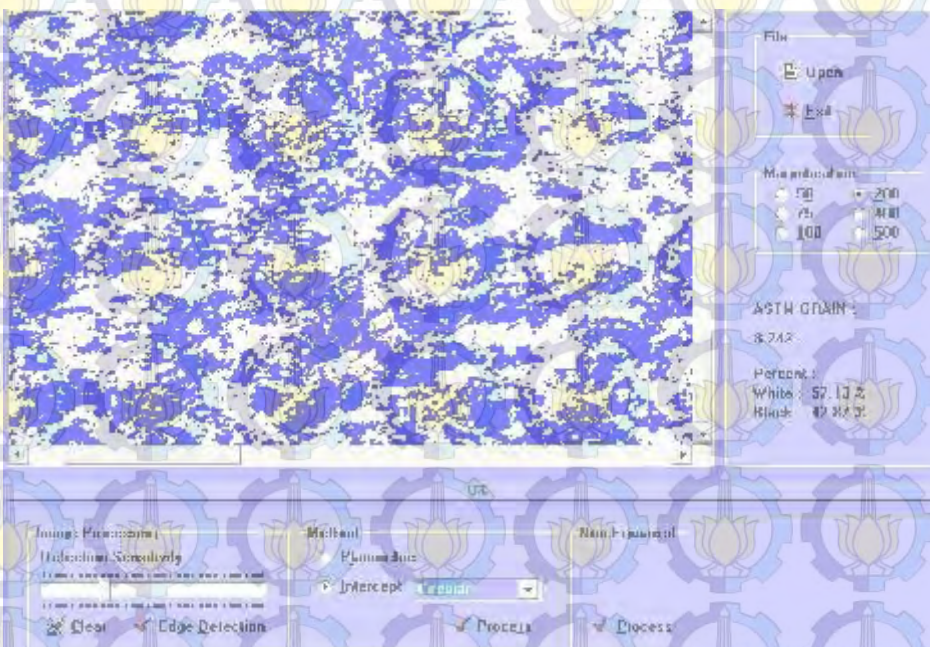
Lampiran E.8 Hasil olahan gambar struktur mikro pada HAZ *repair* 3X



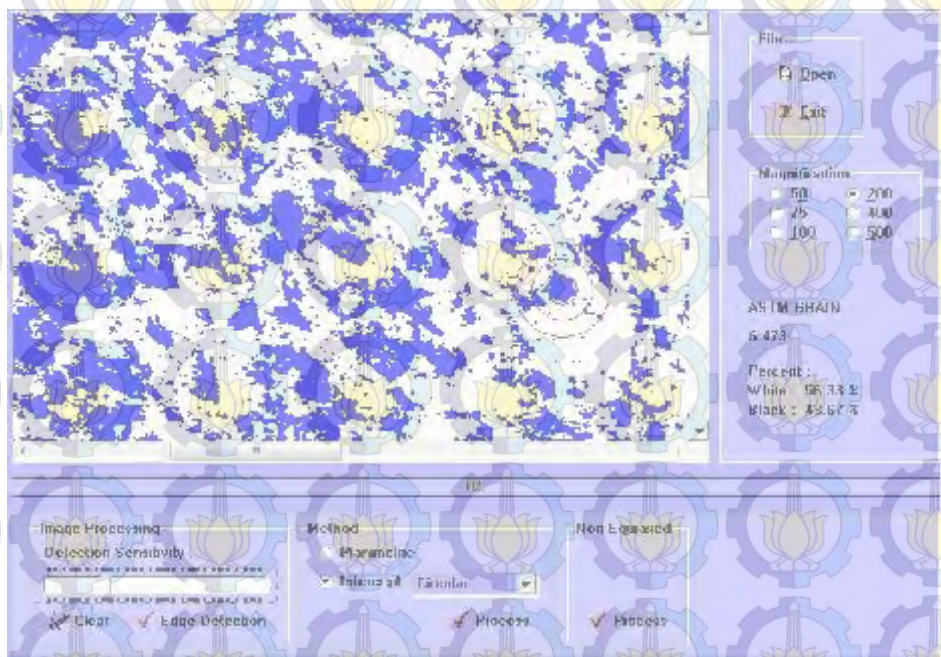
Lampiran E.9 Hasil olahan gambar struktur mikro pada *fusion line* tanpa *repair*



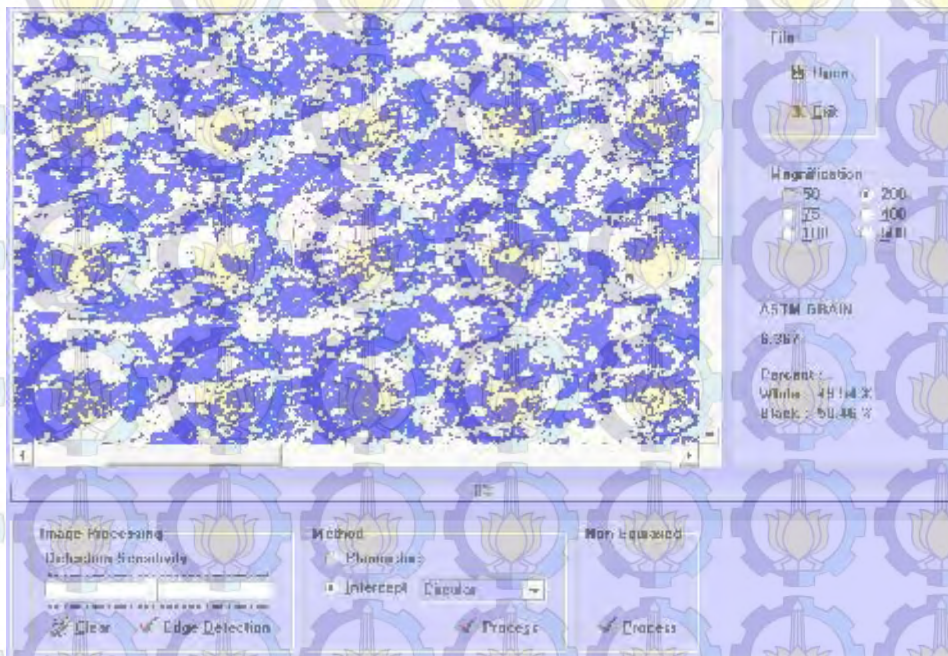
Lampiran E.10 Hasil olahan gambar struktur mikro pada *fusion line repair* 1x



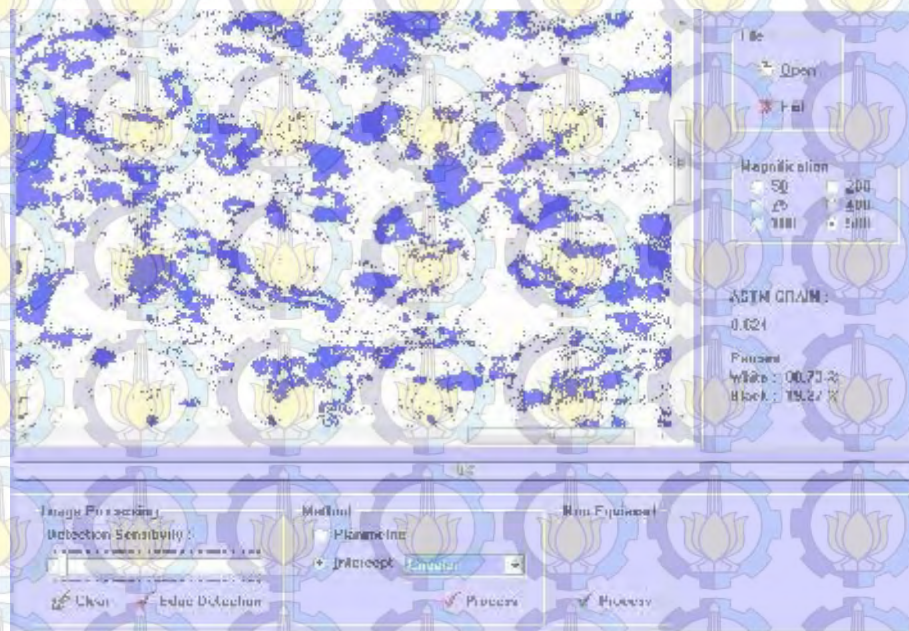
Lampiran E.11 Hasil olahan gambar struktur mikro pada *fusion line repair* 2x



Lampiran E.12 Hasil olahan gambar struktur mikro pada *fusion line repair* 3x



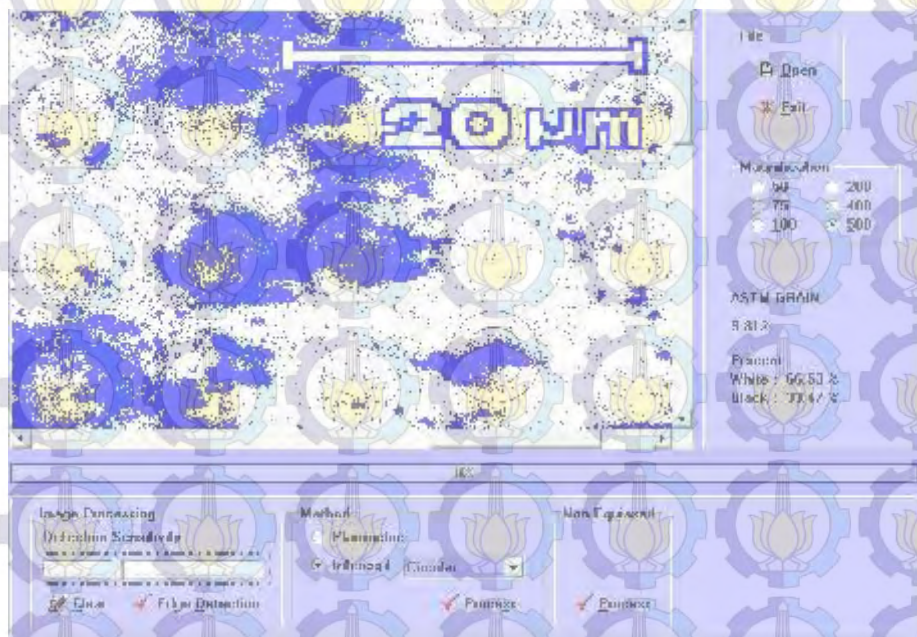
Lampiran E.13 Hasil olahan gambar struktur mikro pada *weld metal* tanpa *repair*



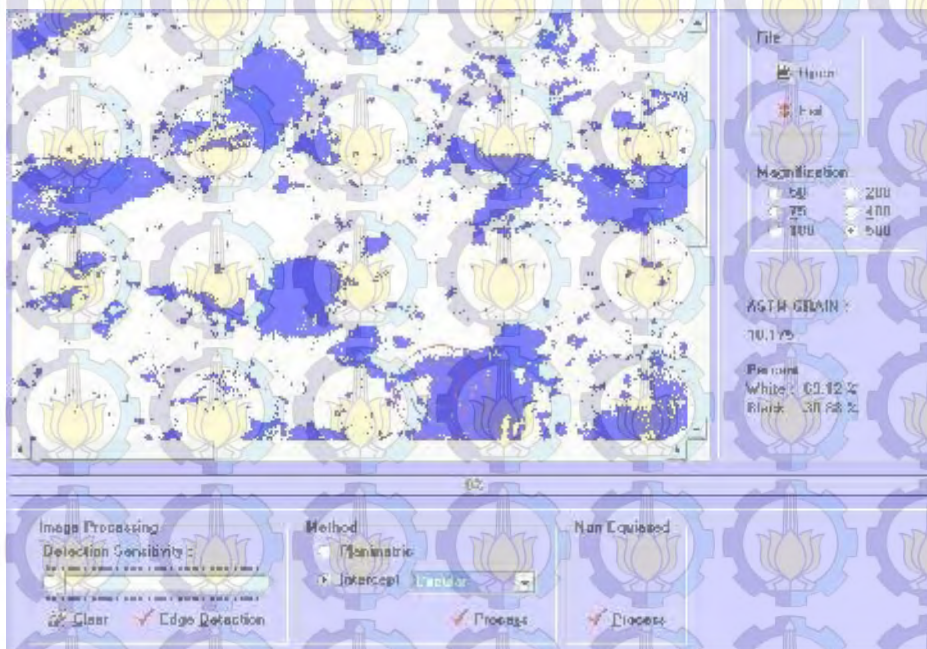
Lampiran E.14 Hasil olahan gambar struktur mikro pada *weld metal* repair 1x



Lampiran E.15 Hasil olahan gambar struktur mikro pada *weld metal repair* 2x



Lampiran E.16 Hasil olahan gambar struktur mikro pada *weld metal repair* 3x



Lampiran F. Peralatan dan Perlengkapan Pengelasan

Lampiran F.1 *Oven* untuk elektroda las



Lampiran F.2 *Oven portable* untuk elektroda las



Lampiran F.3 Elektroda las E7016 Ø 2.6 mm



ROD LENGTH (mm)	RECOMMENDED CURRENT CURRENT RANGE (A)		POSITION OF ELECTRODE
	FLAT	VERTICAL AND OVERHEAD	
300	100-120	100-120	VERTICAL AND OVERHEAD
350	110-130	110-130	VERTICAL AND OVERHEAD
400	120-140	120-140	VERTICAL AND OVERHEAD
450	130-150	130-150	VERTICAL AND OVERHEAD
500	140-160	140-160	VERTICAL AND OVERHEAD
550	150-170	150-170	VERTICAL AND OVERHEAD
600	160-180	160-180	VERTICAL AND OVERHEAD
650	170-190	170-190	VERTICAL AND OVERHEAD
700	180-200	180-200	VERTICAL AND OVERHEAD
750	190-210	190-210	VERTICAL AND OVERHEAD
800	200-220	200-220	VERTICAL AND OVERHEAD
850	210-230	210-230	VERTICAL AND OVERHEAD
900	220-240	220-240	VERTICAL AND OVERHEAD
950	230-250	230-250	VERTICAL AND OVERHEAD
1000	240-260	240-260	VERTICAL AND OVERHEAD

UNDER LICENSE FROM **KOBE STEEL, LTD.**

Lampiran F.4 Elektroda las E7016 Ø 3.2 mm



ROD LENGTH (mm)	RECOMMENDED CURRENT CURRENT RANGE (A)		POSITION OF ELECTRODE
	FLAT	VERTICAL AND OVERHEAD	
300	110-130	110-130	VERTICAL AND OVERHEAD
350	120-140	120-140	VERTICAL AND OVERHEAD
400	130-150	130-150	VERTICAL AND OVERHEAD
450	140-160	140-160	VERTICAL AND OVERHEAD
500	150-170	150-170	VERTICAL AND OVERHEAD
550	160-180	160-180	VERTICAL AND OVERHEAD
600	170-190	170-190	VERTICAL AND OVERHEAD
650	180-200	180-200	VERTICAL AND OVERHEAD
700	190-210	190-210	VERTICAL AND OVERHEAD
750	200-220	200-220	VERTICAL AND OVERHEAD
800	210-230	210-230	VERTICAL AND OVERHEAD
850	220-240	220-240	VERTICAL AND OVERHEAD
900	230-250	230-250	VERTICAL AND OVERHEAD
950	240-260	240-260	VERTICAL AND OVERHEAD
1000	250-270	250-270	VERTICAL AND OVERHEAD

UNDER LICENSE FROM **KOBE STEEL, LTD.**

Manufactured by **PT. INTAN PERTIWI INDUSTRI**

Lampiran F.5 Elektroda gouging Ø 3.2 mm



Lampiran F.6 Mesin las SMAW



Lampiran G. Persiapan Material



Lampiran G.1 Tampilan Material Setelah Dilas Sebelum Di *Repair*



Lampiran H. Pengerjaan *Gouging* dan Tampilan Hasil Pengelasan Setelah *Repair*



Lampiran I. Pemotongan Material untuk Spesimen Uji dan Permesinan



Lampiran J. Peralatan Pengujian

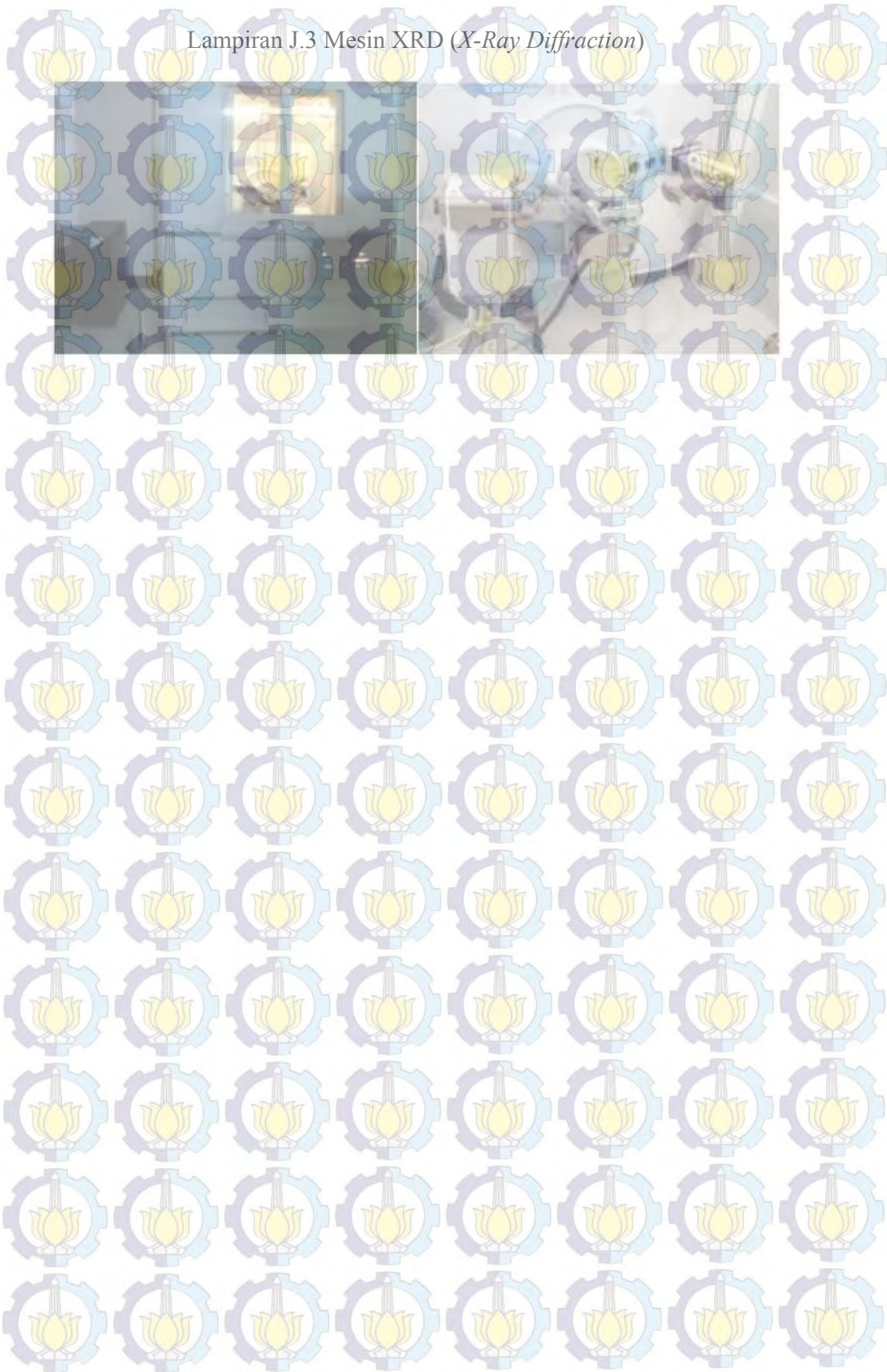
Lampiran J.1 Mesin *micro hardness*



Lampiran J.2 Mesin UTM (*Universal Tensile Machine*)



Lampiran J.3 Mesin XRD (*X-Ray Diffraction*)

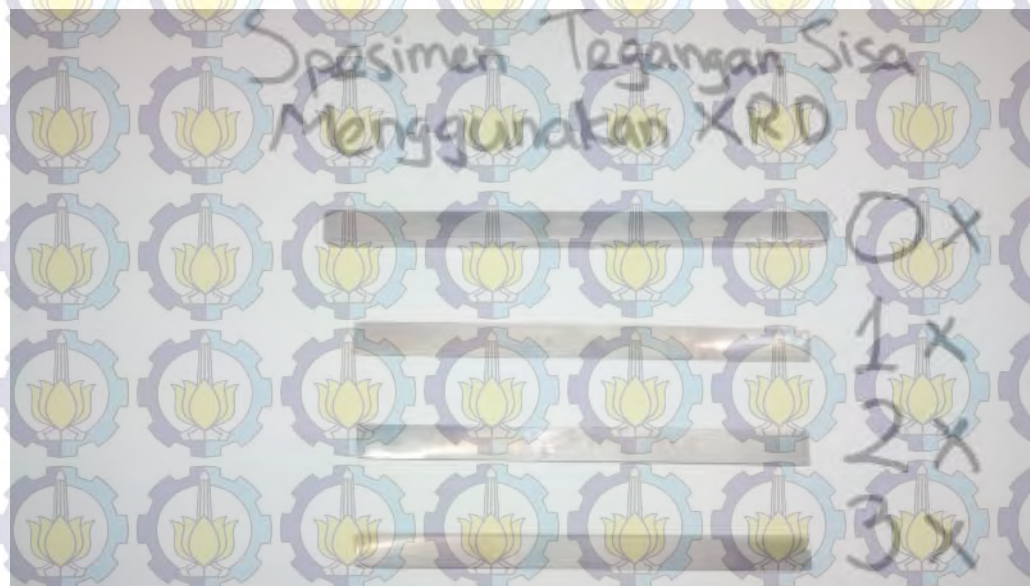


Lampiran K. Spesimen Pengujian

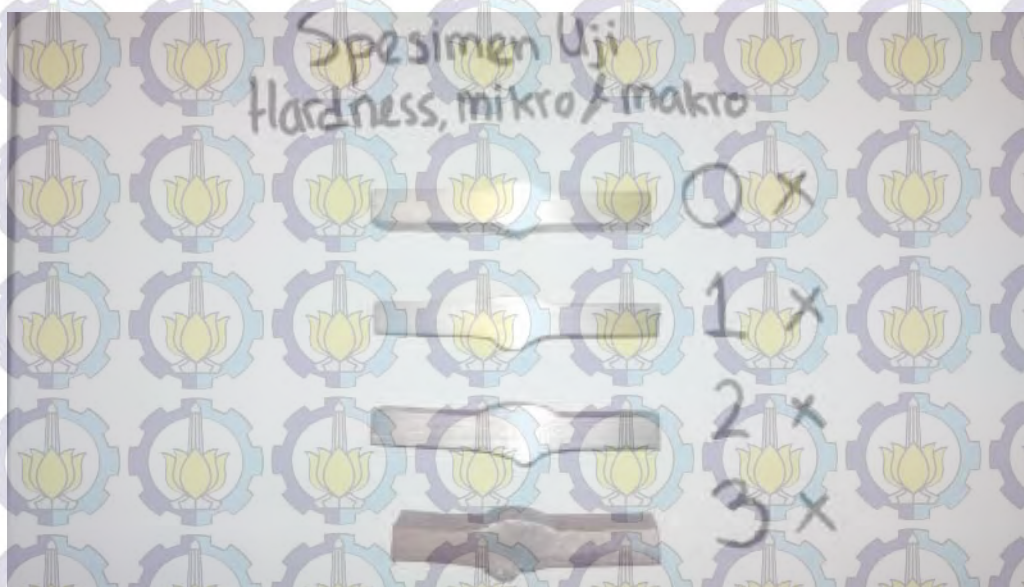
Lampiran K.1 Grafik data uji tarik asli dan spesimen



Lampiran K.2 Spesimen untuk tegangan sisa



Lampiran K.3 Spesimen untuk uji kekerasan, struktur makro dan mikro



RIWAYAT HIDUP PENULIS

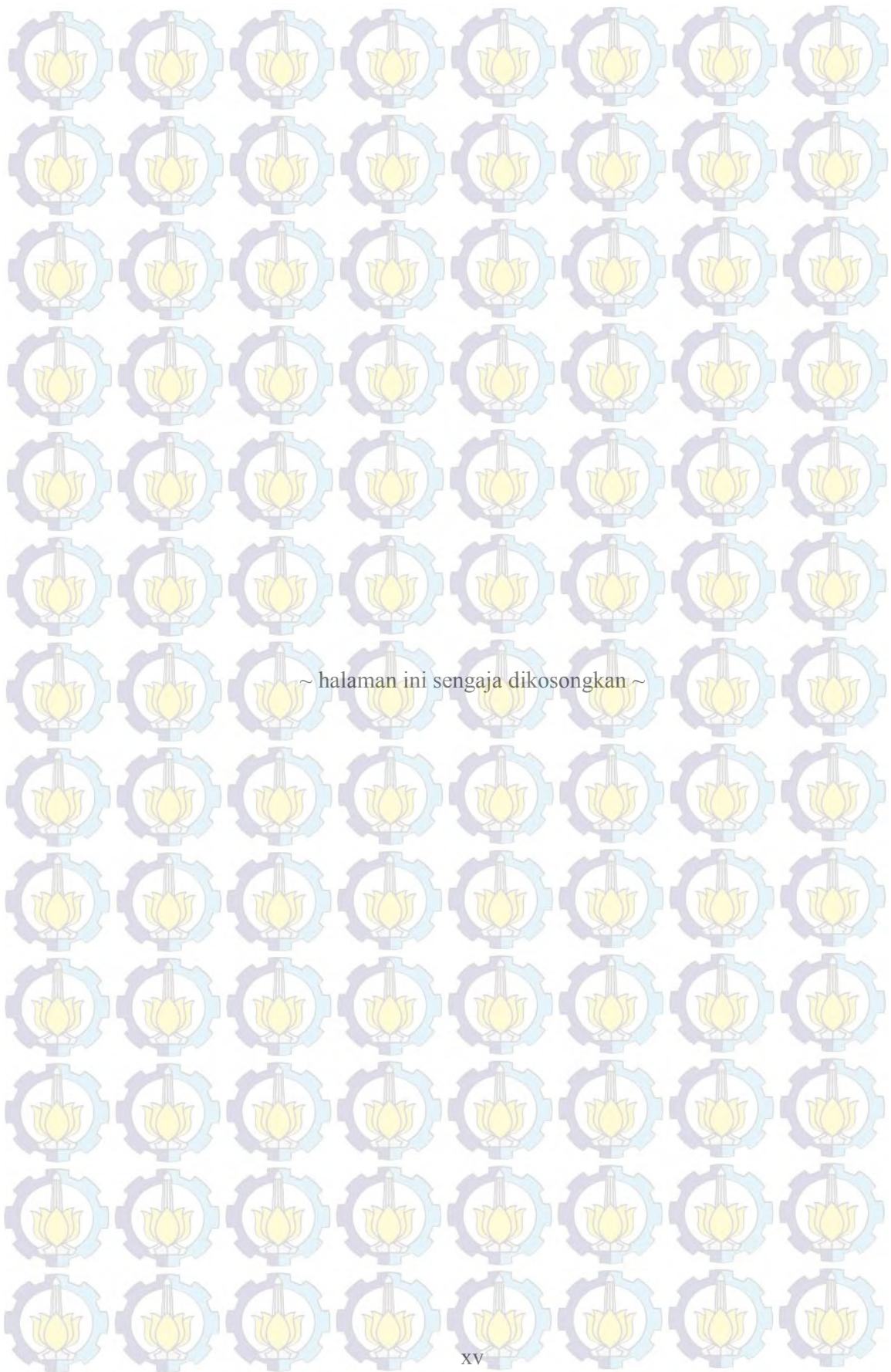


Dimas Triyoga lahir di Bogor 25 november 1990, adalah anak ketiga dari 3 bersaudara. Pendidikan yang pernah ditempuh dimulai dari SDN Bekasi Jaya 10 (1996-2002), kemudian SMPN 18 Bekasi (2002-2005), kemudian SMA 1 PGRI Bekasi (2005-2006), kemudian SMAN 1 Bekasi (2007-2008) dan kuliah di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya – ITS (2008-2012). Penulis adalah mahasiswa jurusan Teknik Bangunan Kapal, Program Studi Teknik Pengelasan di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya-ITS. Selama menjadi mahasiswa, penulis banyak mengikuti berbagai kegiatan terutama dibidang pengelasan antara lain Workshop Welding Spesification (WPS) design for advance (2010) sebagai peserta, Indonesia Welding Competition (2010) sebagai peserta, seminar teknologi pengelasan Aplikasi Non destructive testing Pada Inspeksi Pengelasan (2010) sebagai peserta dan yang terakhir adalah diklat *Welding Inspector* PPNS-ITS (2011), selain itu penulis juga aktif pada kegiatan Unit Kegiatan Mahasiswa pembuatan kapal miniatur sebagai ketua (2009-2010). Pada bulan Agustus 2011-Februari 2012, penulis melakukan kerja praktek (OJT) di PT. Alstom Power Energy System Indonesia. Kemudian dilanjutkan dengan melakukan penelitian tentang Pengaruh Variasi Logam Pengisi Terhadap Sifat Mekanik Sambungan *Brazing* Baja Tahan Karat Austenitik. Melanjutkan kuliah pascasarjana di ITS dengan mengambil jurusan S2 Teknik Material dan Metalurgi (2013-2015) dengan judul tesis Analisa Pengaruh Pengelasan *Multiple Repair* Pada Baja Karbon Rendah Terhadap Sifat Mekanik, Struktur Mikro dan Tegangan Sisa.

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pemotongan busur udara.....	11
Gambar 2.2 Skema metalurgi sambungan pengelasan	12
Gambar 2.3 Siklus termal daerah las dari batas las	14
Gambar 2.4 Diagram distribusi temperatur.....	15
Gambar 2.5 Proses las SMAW	17
Gambar 2.6 Komposisi kimia elektroda E 7016	19
Gambar 2.7 Elektroda las E 7016	20
Gambar 2.8 Bentuk bevel <i>Single V-groove</i>	21
Gambar 2.9 Skema terjadinya tegangan sisa.....	22
Gambar 2.10 Hukum Bragg untuk difraksi Sinar-x	25
Gambar 2.11 Makroetsa hasil perbandingan (a) Tanpa <i>repair</i> , (b) <i>Repair</i> 1x, (c) <i>Repair</i> 2x, (d) <i>Repair</i> 3x, (e) <i>Repair</i> 4x	28
Gambar 2.12 Hasil perbandingan struktur mikro daerah HAZ (a) Tanpa <i>repair</i> , (b) <i>Repair</i> 1x, (c) <i>Repair</i> 2x, (d) <i>Repair</i> 3x, (e) <i>Repair</i> 4x	29
Gambar 2.13 Grafik uji tarik	30
Gambar 2.14 Nilai uji kekerasan pada perbandingan HAZ (a) Tanpa <i>repair</i> , (b) <i>Repair</i> 1x, (c) <i>Repair</i> 2x, (d) <i>Repair</i> 3x, (e) <i>Repair</i> 4x	31
Gambar 2.15 Grafik rekam data hasil pengujian tarik.....	32
Gambar 2.16 Grafik <i>hardness</i> yang terjadi pada setiap daerah.....	33
Gambar 2.17 Skema pengujian struktur mikro	34
Gambar 2.18 <i>Base metal</i> tanpa <i>repair</i>	35
Gambar 2.19 <i>Fusion line</i> pada <i>repair</i> 4 X	35
Gambar 2.20 <i>Weld metal</i> pada <i>repair</i> 4x	36
Gambar 3.1 Dimensi pelat.....	42
Gambar 3.2 Kampuh las.....	42
Gambar 3.3 Elektroda karbon <i>gouging</i>	44
Gambar 3.4 Proses <i>repair</i> menggunakan elektroda karbon <i>gouging</i>	44

Gambar 3.5 Ilustrasi area sambungan yang harus di <i>repair</i>	45
Gambar 3.6 Rancangan pengambilan spesimen.....	46
Gambar 3.7 Grafik $P - \Delta L$	47
Gambar 3.8 Spesimen uji tarik	48
Gambar 3.9 Dimensi dan rencana pengambilan titik kekerasan.....	50
Gambar 3.10 Pengambilan spesimen tegangan sisa	51
Gambar 3.11 Diagram Alir Penelitian	54
Gambar 4.1 Tampilan perbandingan makro etsa dari variabel pengelasan : (a) Tanpa <i>repair</i> , (b) <i>repair</i> 1x, (c) <i>repair</i> 2x, (d) <i>repair</i> 3x	54
Gambar 4.2 Tampilan perbandingan <i>plotting</i> makro etsa dari variabel pengelasan : (e) Tanpa <i>repair</i> , (f) <i>repair</i> 1x, (g) <i>repair</i> 2x, (h) <i>repair</i> 3x	58
Gambar 4.3 Tampilan perbandingan struktur mikro <i>base metal</i> dari variabel pengelasan : (a) Tanpa <i>repair</i> , (b) <i>repair</i> 1x, (c) <i>repair</i> 2x, (d) <i>repair</i> 3x.....	60
Gambar 4.4 Tampilan perbandingan struktur mikro HAZ dari variabel pengelasan : (a) Tanpa <i>repair</i> , (b) <i>repair</i> 1x, (c) <i>repair</i> 2x, (d) <i>repair</i> 3x.....	61
Gambar 4.5 Tampilan perbandingan struktur mikro <i>fusion line</i> dari variabel pengelasan : (a) Tanpa <i>repair</i> , (b) <i>repair</i> 1x, (c) <i>repair</i> 2x, (d) <i>repair</i> 3x.....	63
Gambar 4.6 Tampilan perbandingan struktur mikro <i>weld metal</i> dari variabel pengelasan : (a) Tanpa <i>repair</i> , (b) <i>repair</i> 1x, (c) <i>repair</i> 2x, (d) <i>repair</i> 3x.....	65
Gambar 4.7 Grafik nilai rata-rata hasil uji tarik	67
Gambar 4.8 Grafik nilai rata-rata sebaran hasil uji kekerasan	69
Gambar 4.9 Grafik nilai rata-rata total tegangan pada masing-masing spesimen	71



The Analysis Effect of Multiple Repair Welding to Low Carbon Steel On Mechanical Properties, Microstructure and Residual Stress

Dimas Triyoga

Master Degree Student of Department Material and Metallurgical Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
dtriyoga@gmail.com, +6285648509540

Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA

Lecturer of Department Material and Metallurgical Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

ABSTRACT

The possibility of error in the welding process can't be avoided and caused fatal to the structure itself. In term to overcome this situation a treatment is necessary to repair it, if the errors in the welding process is then repeated to perform multiple weld repair at the joint. Then result of multiple repairs will carried out affect greatly to the mechanical properties and microstructures. This research was investigating about multiple repair welding where weld defect assumed to accour into ASTM A36 steel plate weld joints. Using E7016 as the weld electrode and carbon electrode for its repair. Using SMAW for the weld method and gouging method as the repair weldment and 1G (flat) as its position. Through the all analysis from macro structures to the repair variables 1x, 2x and 3x along with the repair locations at weld bead to middle of weld metal have found many developments to the width of HAZ area with 7.4%, 10.44% and 13.51% in each variables. Micro structures analysis have not found any martensite phase from the non repaired to the third times repaired. On the other hand, HAZ grain size found increasing with 9 %, 9.56% and 10.13% in each variables. Tensile tests have found increasing, as the tensile values into repaired 3x is the highest with 511.17 MPa compared to non repaired and repaired 1x and 2x. Hardness average values also have been found increased at all area along with percentage values are 0.9% (base metal), 1.14% (HAZ) and 9.3% (weld metal), in each variable. The highest hardness have been reached by 3x repaired with 215 HVN at weld metal area. Residual stress also found another increasing average values as the same as the repair gouging has been added in number at each variables, as the values showed 91.94 MPa (base metal), 89.91 (HAZ) and 137.552 MPa (weld metal). All the result analysis concluded that by the time repair welding has been added in number will increase the size of grain and produce residual stress which will be changing the mechanical properties along with the residual value and it can be concluded that the number of repair welding not to be allowed in 2x for the purpose material, since it was produced bigger values when it was added

Keywords : ASTM A36 steel, Location of multiple repair welding, Mechanical tests, Residual stress analysis by XRD, Macro and microstructure examination.

I. INRTODUCTION

Repair welding can affect a result of welding products to be able to produce components that are safe and capable of being used in accordance with its provisions.

MacGaughy [3] stated that the improvement of repair welding generates residual stresses that can damage, this is due to the widening HAZ areas with marked improvement in the area of the details so that the mechanical values go down. If the quality of the work

produced ugly and cause failure, then the insurance claims to be paid is large and appear on the customer's dissatisfaction that led to huge losses. In welding, the strength of the connection must be observed and guaranteed strength, so expect minimal strength equal to the strength of the base metal. But in any work activities including one of them is a welding process there is always a risk of failure in the process of the process so that the necessary repairs or repair. Mulyaningsih [4] stated that the risk of failure in the welding process will potentially cause stress concentrations that would cause failure of the structure. In this case the repair treatment has an important role to support the quality of the welds. In addition, repair treatment also has a great influence for the region HAZ (Heat Affected

Zone) and welded joints that need to be noteworthy things.

II. PREPARATION

This research is using low carbon steel plate ASTM A36 and formed 400 x 300 x 9 mm for its dimension. The plate were joined by welding and weld defect assumed to accour in the weld joints, so then need to be repaired. Using SMAW for the weld method and gouging method as the repair weldment. The repair variables are 1x, 2x and 3x along with the repair locations at weld bead to middle of weld metal, respectively. Using E7016 as the weld electrode and carbon electrode for its repair. As for analyzing the results of the tests in this study include hardness test, tensile test and residual stress analysis by XRD.

III. RESULTS

Based on the observations it seems clear that width of HAZ both the weld reset (repair) 1x, 2x and 3x or without repair seemed very disorganized and tends to increase as shown by the results of plotting in Figure 2 along with the increasing process of given repair, and marked by overlapping the bevel grind the base metal. Dipo [7] through his research revealed this to happen as a result of re-welding when excess heat received, in addition to the gouging process also serves to raise the temperature of the material is almost 2 times greater than during the welding process. HAZ area widening increasingly of each specimen indicates the grain growth as a result of the increasing number of heat exposure welding and repair amount received in each speimen where the heat reached asutemit temperature which is sufficient to alter the dimensions of grains in the HAZ area.

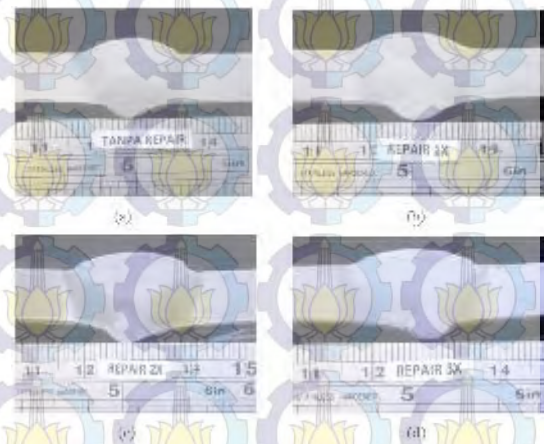


Figure 1. Views comparison macro etching of welding variables: (a) without repair, (b) repair 1x, (c) repair 2x, (d) repair 3x.

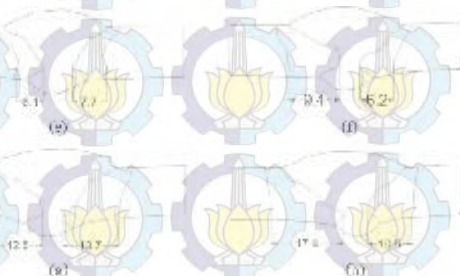


Figure 2. Views comparison plotting macro etching of welding variables: (a) without repair, (b) repair 1x, (c) repair 2x, (d) repair 3x.

Results of analysis of the microstructure in HAZ area in Figure 3 can be seen that the grain size of perlite growing mainly seen in specimen 3x repair. This phenomenon is believed to occur as a result from continuing growth in the size of the dimension of perlite along with the increasing number of welding repair that caused larger heat exposure. It is also revealed by Ulum [6] through his research revealed that exposure to the heat received at minimal HAZ area reaches a temperature of austenite so as to make the microstructure in HAZ undergoing a process of recovery. During recovery, residual stress on the microstructure have enough power to release the tension. Then entered a phase recrystallization or the emergence of new grains at grain boundaries. Of new grains continue to grow in line with increasing temperature (grain growth)

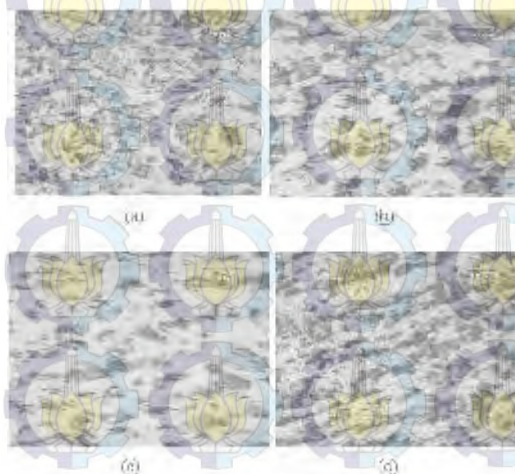


Figure 3. Views comparison HAZ microstructures of welding variables: (a) without repair, (b) repair 1x, (c) repair 2x, (d) repair 3x

Through tensile testing can be seen that there is an increase in tensile and yield results stress the value of the average as shown in Figure 4. The increasing value when referring to the minimum tensile steel required for ASTM A36 at 400-500 MPa, then it is certainly the average value of the tensile test shown 456 931 MPa, 479 264 and 511 173 MPa with multiple repair

welding variables 1x, 2x and 3x are still be allowed to be used when referring to the provisions contained in the ASME IX 2010. Where one point wrote that the value of the tensile test results of welded joints at least the same as the tensile value of the parent metal.

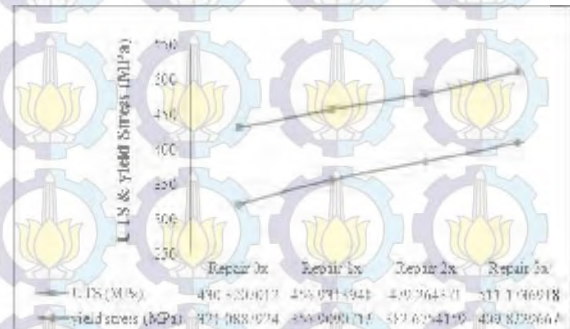


Figure 4. The average value chart of the tensile test results

From the chart on the hardness test results in Figure 5 shown the distribution of average hardness values of the specimen welds without repair is the lowest when compared to other areas of hardness point to the HAZ shows the relative decline in the value of each variable, it indicates the presence of growth grains in these areas as such as shown in Figure 3. According to Hall [1] and Petch [5] a rough-shaped grain growth in HAZ area will cause metal strength decrease while the phase transformations that occur in the area will also be accompanied by the temperature gradient. In general in this area occurs the heat treatment process with all kinds of aspects that influence such as high temperature and duration of heating, cooling rate, including the presence or absence of heat pre and post heat generated and the type of phase. HAZ micro-structure shown indeed be evidence of grain growth resulting in lower HAZ hardness values on average in each specimen as a result of heat exposure is increasing. Indication of grain growth in the HAZ resulting in lower hardness value, this does not apply to the area of the weld metal that has a grain size that is growing, especially specimens 3x repair.

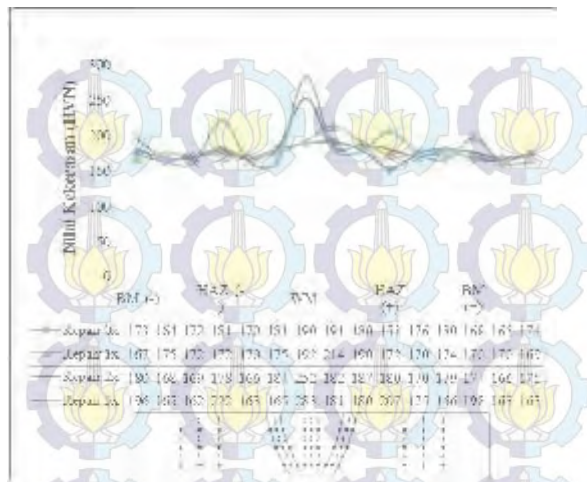


Figure 5. The average value chart of the hardness distribution

Based on residual stress analysis on specimen repair 3x is starting to increase for residual stress values in all areas both on the base metal, HAZ and weld metal as seen in Figure 6. This increase values have indicated a significant increase in the grain growth. As seen in Figure 3 on the display of HAZ's microstructures which grain growth was showing much larger, and increases in size when compared with non repair, 1x repair and 2x repair. The increase is certainly due to a combination of heat exposure both welding and gouging.

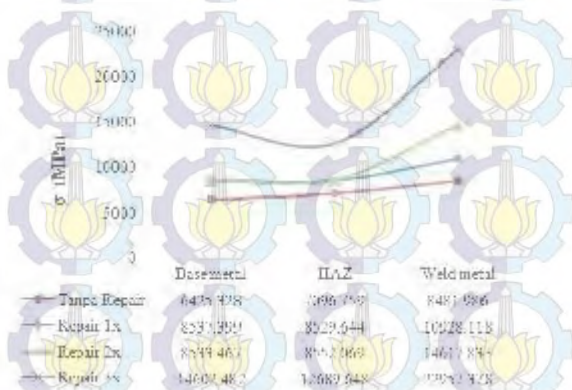


Figure 6. The average value chart of the residual total on each specimen

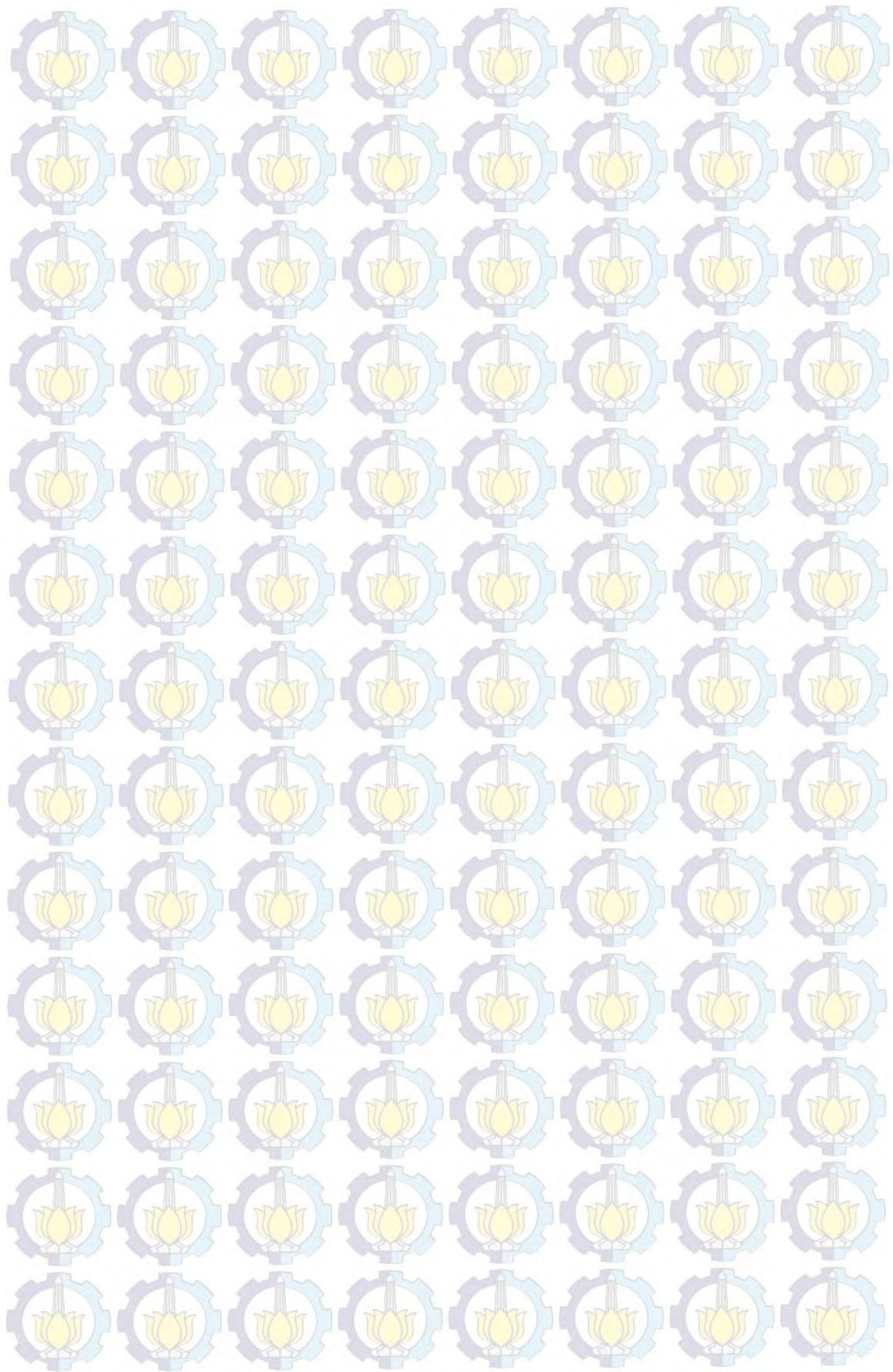
Through this residual stress testing revealed that the recommendation for the amount of repair should be done as much as 2x due to residual stress values that are too high resulting in 3x repair specimen, although the value of the tensile test specimens repair 3x are still qualified in otherwise require the standards provided under ASME IX 2010.

IV. ACKNOWLEDGMENT

Highly gratitude to the contributions from Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA for spending time and valuable comments in this works and Ship Building of Polytechnic Surabaya (SHIPS) for hosting the international seminar on advanced welding and joining technology, in order to publish this research.

V. REFERENCES

- [1] Hall, E.O. (1951), *The Deformation and Ageing of Mild Steel : III Discussion of result*. Proc. Phys. Soc. London, hal. 64:747-753.
- [2] Kou, Sin do. (2002), *Welding Metalurgy 2nd Edition*, John Wiley & Sons, Inc, New Jersey.
- [3] McGaughy, T. (1990), *Significance of changes in residual stresses and mechanical properties due to SMAW repair girth welds in line pipe*. Edison Welding Institute and Pipeline Research Council International, hal. 1-18.
- [4] Mulyaningsih, D.R. (2009), *Analisa Resiko Cacat Las Pada Pengelasan Tubular Joint Jacket dengan Menggunakan Metode Diagram Ishikawa*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Tugas Akhir, Surabaya.
- [5] Petch, N.J. (1953), *The Cleavage Strength of Polycrystals*, J.Iron Steel Institute, London, hal. 173:25-28.
- [6] Ulum, Miftahul. (2011), *Analisis Pengaruh Multiple Repair Welding pada Material Baja Paduan Rendah Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro*, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya-ITS, Tugas Akhir, Surabaya.
- [7] Vega, O.E. (2008), *Effect of multiple repairs in girth welds of pipelines on the mechanical properties*, Departamento de Ingenieria Metalurgica, Mexico.
- [8] Wirarchi, Dipo. (2010), *Analisa Pengaruh Multiple Repair Welding Pada Material Propeties Weld Joint Material Pipa ASTM A106 Gr.B SCH 80*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Tugas Akhir, Surabaya.



Laporan Tesis (TL142501)

Analisa Pengaruh Pengelasan *Multiple Repair*
Baja Karbon Rendah Terhadap Sifat Mekanik,
Struktur Mikro dan Tegangan Sisa

DIMAS TRIYOGA

NRP. 2713201002

DOSEN PEMBIMBING

Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA

PROGRAM STUDI MAGISTER
JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA

2015

Latar Belakang

Dalam pengelasan, kekuatan sambungan harus diperhatikan dan dijamin kekuatannya, sehingga diharapkan minimal kekuatannya sama dengan kekuatan *base metal*. Namun dalam setiap aktifitas pekerjaan termasuk salah satunya adalah proses pengelasan selalu ada resiko gagal dalam proses pengerjaannya sehingga diperlukan perbaikan atau *repair*

Berbagai kemungkinan terjadi kesalahan dalam proses pengelasan tidak dapat dihindari dan akan berakibat fatal bagi komponen itu sendiri. Hal tersebut diatas dapat terjadi akibat *human error* atau kesalahan prosedur. Seperti kesalahan sudut pengelasan dan konsentrasi tukang las mulai menurun sehingga terjadi *defect*. Untuk mengatasinya diperlukan perlakuan *repair*, apabila kesalahan dalam proses pengelasan dilakukan berulang kali maka perlu dilakukan *Multiple Repair Welding* pada sambungan las tersebut. Akibat dari *Multiple Repair Welding* yang dilakukan akan berpengaruh besar terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pada material induk itu sendiri.

Rumusan Masalah

1

- Bagaimana pengaruh kekuatan tarik sambungan las pada material baja karbon rendah yang dilas tanpa *repair* dibandingkan dengan sambungan las yang terkena *multiple repair*

2

- Bagaimana pengaruh kekerasan pada area sambungan las pada material baja karbon rendah yang dilas tanpa *repair* dibandingkan dengan area sambungan las yang terkena *multiple repair*

3

- Bagaimana hasil pengamatan metalografi berupa hasil makro etsa dan struktur mikro berikut dengan fasa sambungan las pada material baja karbon rendah yang dilas tanpa *repair* dibandingkan dengan sambungan las yang terkena *multiple repair*

4

- Bagaimana persebaran tegangan sisa yang dihasilkan pada material baja karbon rendah yang dilas tanpa *repair* dibandingkan dengan sambungan las yang terkena *multiple repair*

Tujuan Penelitian

Menganalisa pengaruh banyaknya pengelasan hingga mencapai 3 (tiga) kali *repair* dibandingkan dengan pengelasan tanpa *repair* terhadap sifat mekanik (uji tarik & kekerasan), perubahan struktur mikro dan sebaran tegangan sisa yang terdapat pada area sambungan lasan

Batasan Masalah

2

- Material uji adalah material baja karbon rendah

3

- Parameter diluar dari arus las dan voltase selama pengelasan diasumsikan tetap

4

- Hasil penyambungan las diasumsikan terdapat cacat didalam logam las sehingga diperlukan metode *Multiple Repair*

5

- Efek regangan plastik dan laju regangannya akibat pengaruh panas pengelasan diabaikan

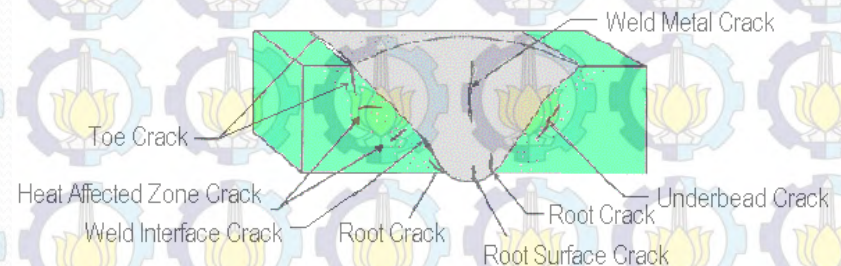
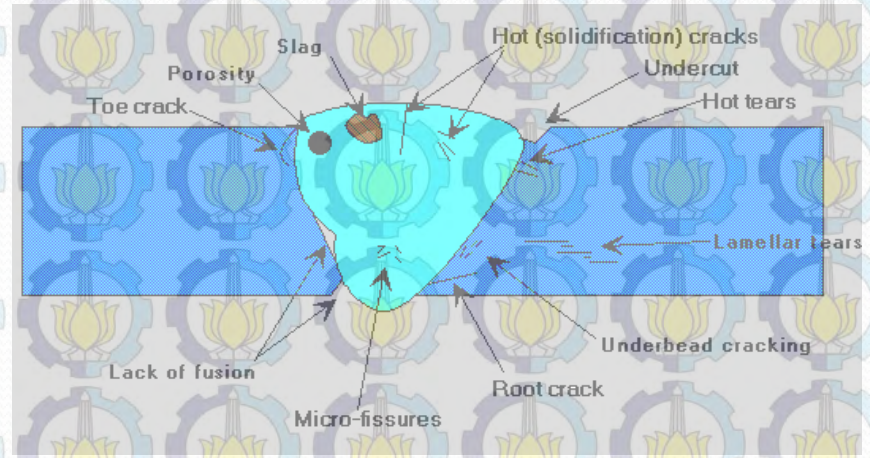
6

- Pengaruh kondisi lingkungan diabaikan

Repair Welding

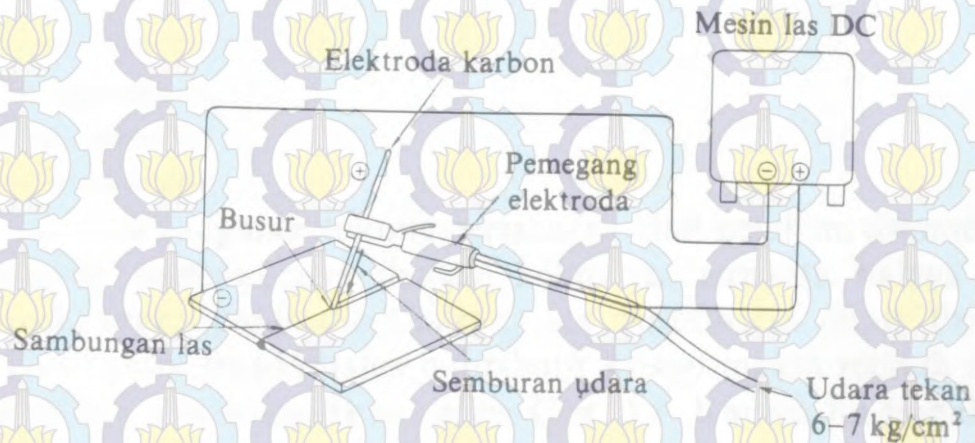
Umum dilakukan apabila terdapat cacat pada hasil lasan, diantaranya :

1. Undercut
2. Open surface porosity
3. Cracking
4. Subsurface porosity
5. Slag inclusion
6. Incomplete penetration
7. Incomplete fusion



Sumber : William Callister

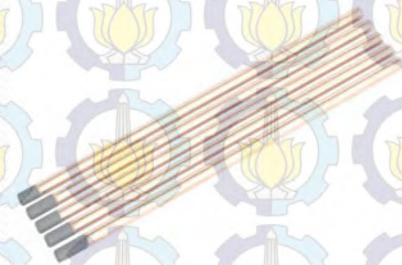
Arc Gouging



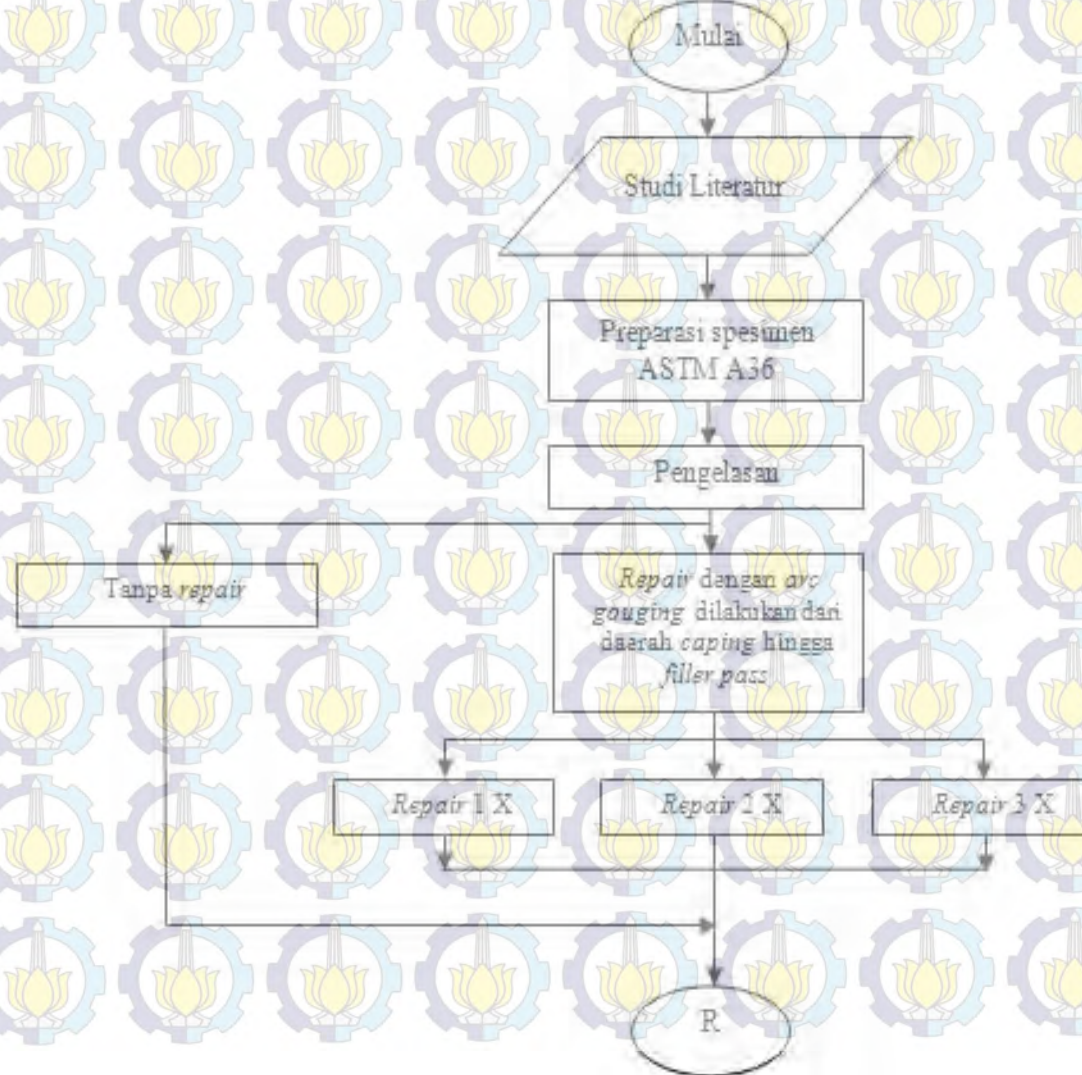
Tipe Elektroda *Gouging*

Tipe elektroda yang digunakan :

- Elektroda *carbon gouging*
- Elektroda khusus



Metode Penelitian



R

Pengumpulan data meliputi:

1. Kekerasan sebanyak 1 sampel dari setiap test coupon, diambil pada 3 layer dari setiap area las, diambil:
 - 3 titik di weld metal
 - 3 titik di HAZ
 - 3 titik di base metal
2. Pengujian tarik
3. Makro etsa
4. Struktur mikro
5. XRD untuk tegangan sisa

Pengujian sampel

Uji kekerasan

Uji tarik

Uji makro etsa

Uji struktur mikro

XRD

Analisa Data dan Pembahasan

Kesimpulan

Selesai

Material Penelitian

❖ Pelat ASTM A36

Tabel 2.1 Komposisi Kimia ASTM A36

Elemen	Besaran kandungan (%)
C	0,25-0,290
Cu	0,20
Fe	98,0
Mn	1,03
P	0,040
Si	0,280
S	0,050

Tabel 2.2 Nilai Mekanik ASTM A36

Nilai Mekanik	Satuan metrik
Kekuatan tarik maksimum	400-500 MPa
Kekuatan tarik yield	250 MPa
Elongasi	20% - 23%
Modulus elastisitas	200 GPa
Bulk modulus	140 GPa
Poissons ratio	0,260
Modulus geser	79,3 GPa
Densitas	7,85 g/cm ³

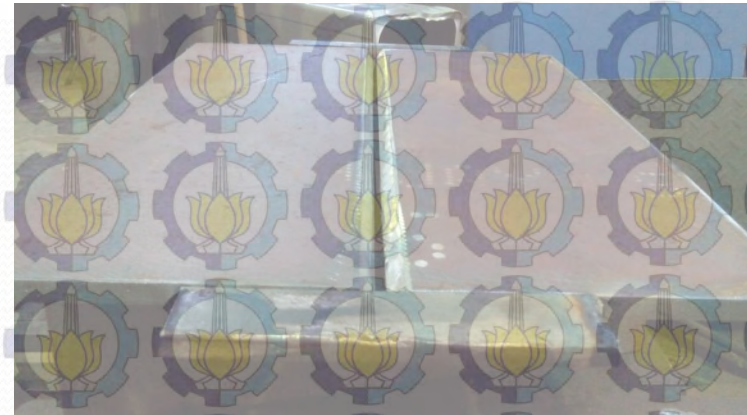
Persiapan Material



Gambar 3.3 Dimensi Pelat

Keterangan:

- $P = 150 \text{ mm}$
- $L = 400 \text{ mm}$
- $t = 9 \text{ mm}$



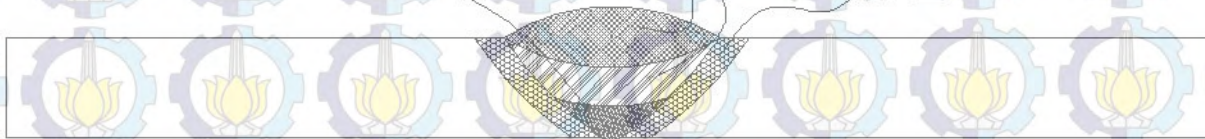
Pengerjaan Pengelasan

- Proses pengelasan pada semua sambungan pelat yang akan disambung menggunakan proses las SMAW
- Menggunakan elektroda E7016 Ø 2.6 mm (root pass) & 3.2 mm (filler pass & capping)

Mahkota las/Caping/Reinforcement

Akar las/Root pass

Bagian tengah/Filler pass
HAZ



RECOMMENDED CURRENT		CURRENT RANGE (A)		POLARITY OF ELECTRODE
DIA X LENGTH (mm)		FLAT	VERTICAL AND OVERHEAD	
3	300	65	85	DC+ / AC
4	350	75	95	DC+ / AC
5	400	85	105	DC+ / AC
6	450	95	115	DC+ / AC
8	550	115	135	DC+ / AC
10	650	135	155	DC+ / AC
12	750	155	175	DC+ / AC
14	850	175	195	DC+ / AC
16	950	195	215	DC+ / AC
18	1050	215	235	DC+ / AC
20	1150	235	255	DC+ / AC
22	1250	255	275	DC+ / AC
24	1350	275	295	DC+ / AC
26	1450	295	315	DC+ / AC
28	1550	315	335	DC+ / AC
30	1650	335	355	DC+ / AC
32	1750	355	375	DC+ / AC
34	1850	375	395	DC+ / AC
36	1950	395	415	DC+ / AC
38	2050	415	435	DC+ / AC
40	2150	435	455	DC+ / AC
42	2250	455	475	DC+ / AC
44	2350	475	495	DC+ / AC
46	2450	495	515	DC+ / AC
48	2550	515	535	DC+ / AC
50	2650	535	555	DC+ / AC
52	2750	555	575	DC+ / AC
54	2850	575	595	DC+ / AC
56	2950	595	615	DC+ / AC
58	3050	615	635	DC+ / AC
60	3150	635	655	DC+ / AC
62	3250	655	675	DC+ / AC
64	3350	675	695	DC+ / AC
66	3450	695	715	DC+ / AC
68	3550	715	735	DC+ / AC
70	3650	735	755	DC+ / AC
72	3750	755	775	DC+ / AC
74	3850	775	795	DC+ / AC
76	3950	795	815	DC+ / AC
78	4050	815	835	DC+ / AC
80	4150	835	855	DC+ / AC
82	4250	855	875	DC+ / AC
84	4350	875	895	DC+ / AC
86	4450	895	915	DC+ / AC
88	4550	915	935	DC+ / AC
90	4650	935	955	DC+ / AC
92	4750	955	975	DC+ / AC
94	4850	975	995	DC+ / AC
96	4950	995	1015	DC+ / AC
98	5050	1015	1035	DC+ / AC
100	5150	1035	1055	DC+ / AC
102	5250	1055	1075	DC+ / AC
104	5350	1075	1095	DC+ / AC
106	5450	1095	1115	DC+ / AC
108	5550	1115	1135	DC+ / AC
110	5650	1135	1155	DC+ / AC
112	5750	1155	1175	DC+ / AC
114	5850	1175	1195	DC+ / AC
116	5950	1195	1215	DC+ / AC
118	6050	1215	1235	DC+ / AC
120	6150	1235	1255	DC+ / AC
122	6250	1255	1275	DC+ / AC
124	6350	1275	1295	DC+ / AC
126	6450	1295	1315	DC+ / AC
128	6550	1315	1335	DC+ / AC
130	6650	1335	1355	DC+ / AC
132	6750	1355	1375	DC+ / AC
134	6850	1375	1395	DC+ / AC
136	6950	1395	1415	DC+ / AC
138	7050	1415	1435	DC+ / AC
140	7150	1435	1455	DC+ / AC
142	7250	1455	1475	DC+ / AC
144	7350	1475	1495	DC+ / AC
146	7450	1495	1515	DC+ / AC
148	7550	1515	1535	DC+ / AC
150	7650	1535	1555	DC+ / AC
152	7750	1555	1575	DC+ / AC
154	7850	1575	1595	DC+ / AC
156	7950	1595	1615	DC+ / AC
158	8050	1615	1635	DC+ / AC
160	8150	1635	1655	DC+ / AC
162	8250	1655	1675	DC+ / AC
164	8350	1675	1695	DC+ / AC
166	8450	1695	1715	DC+ / AC
168	8550	1715	1735	DC+ / AC
170	8650	1735	1755	DC+ / AC
172	8750	1755	1775	DC+ / AC
174	8850	1775	1795	DC+ / AC
176	8950	1795	1815	DC+ / AC
178	9050	1815	1835	DC+ / AC
180	9150	1835	1855	DC+ / AC
182	9250	1855	1875	DC+ / AC
184	9350	1875	1895	DC+ / AC
186	9450	1895	1915	DC+ / AC
188	9550	1915	1935	DC+ / AC
190	9650	1935	1955	DC+ / AC
192	9750	1955	1975	DC+ / AC
194	9850	1975	1995	DC+ / AC
196	9950	1995	2015	DC+ / AC
198	10050	2015	2035	DC+ / AC
200	10150	2035	2055	DC+ / AC
202	10250	2055	2075	DC+ / AC
204	10350	2075	2095	DC+ / AC
206	10450	2095	2115	DC+ / AC
208	10550	2115	2135	DC+ / AC
210	10650	2135	2155	DC+ / AC
212	10750	2155	2175	DC+ / AC
214	10850	2175	2195	DC+ / AC
216	10950	2195	2215	DC+ / AC
218	11050	2215	2235	DC+ / AC
220	11150	2235	2255	DC+ / AC
222	11250	2255	2275	DC+ / AC
224	11350	2275	2295	DC+ / AC
226	11450	2295	2315	DC+ / AC
228	11550	2315	2335	DC+ / AC
230	11650	2335	2355	DC+ / AC
232	11750	2355	2375	DC+ / AC
234	11850	2375	2395	DC+ / AC
236	11950	2395	2415	DC+ / AC
238	12050	2415	2435	DC+ / AC
240	12150	2435	2455	DC+ / AC
242	12250	2455	2475	DC+ / AC
244	12350	2475	2495	DC+ / AC
246	12450	2495	2515	DC+ / AC
248	12550	2515	2535	DC+ / AC
250	12650	2535	2555	DC+ / AC
252	12750	2555	2575	DC+ / AC
254	12850	2575	2595	DC+ / AC
256	12950	2595	2615	DC+ / AC
258	13050	2615	2635	DC+ / AC
260	13150	2635	2655	DC+ / AC
262	13250	2655	2675	DC+ / AC
264	13350	2675	2695	DC+ / AC
266	13450	2695	2715	DC+ / AC
268	13550	2715	2735	DC+ / AC
270	13650	2735	2755	DC+ / AC
272	13750	2755	2775	DC+ / AC
274	13850	2775	2795	DC+ / AC
276	13950	2795	2815	DC+ / AC
278	14050	2815	2835	DC+ / AC
280	14150	2835	2855	DC+ / AC
282	14250	2855	2875	DC+ / AC
284	14350	2875	2895	DC+ / AC
286	14450	2895	2915	DC+ / AC
288	14550	2915	2935	DC+ / AC
290	14650	2935	2955	DC+ / AC
292	14750	2955	2975	DC+ / AC
294	14850	2975	2995	DC+ / AC
296	14950	2995	3015	DC+ / AC
298	15050	3015	3035	DC+ / AC
300	15150	3035	3055	DC+ / AC
302	15250	3055	3075	DC+ / AC
304	15350	3075	3095	DC+ / AC
306	15450	3095	3115	DC+ / AC
308	15550	3115	3135	DC+ / AC
310	15650	3135	3155	DC+ / AC
312	15750	3155	3175	DC+ / AC
314	15850	3175	3195	DC+ / AC
316	15950	3195	3215	DC+ / AC
318	16050	3215	3235	DC+ / AC
320	16150	3235	3255	DC+ / AC
322	16250	3255	3275	DC+ / AC
324	16350	3275	3295	DC+ / AC
326	16450	3295	3315	DC+ / AC
328	16550	3315	3335	DC+ / AC
330	16650	3335	3355	DC+ / AC
332	16750	3355	3375	DC+ / AC
334	16850	3375	3395	DC+ / AC
336	16950	3395	3415	DC+ / AC
338	17050	3415	3435	DC+ / AC
340	17150	3435	3455	DC+ / AC
342	17250	3455	3475	DC+ / AC
344	17350	3475	3495	DC+ / AC
346	17450	3495	3515	DC+ / AC
348	17550	3515	3535	DC+ / AC
350	17650	3535	3555	DC+ / AC
352	17750	3555	3575	DC+ / AC
354	17850	3575	3595	DC+ / AC
356	17950	3595	3615	DC+ / AC
358	18050	3615	3635	DC+ / AC
360	18150	3635	3655	DC+ / AC
362	18250	3655	3675	DC+ / AC
364	18350	3675	3695	DC+ / AC
366	18450	3695	3715	DC+ / AC
368	18550	3715	3735	DC+ / AC
370	18650	3735	3755	DC+ / AC
372	18750	3755	3775	DC+ / AC
374	18850	3775	3795	DC+ / AC
376	18950	3795	3815	DC+ / AC
378	19050	3815	3835	DC+ / AC
380	19150	3835	3855	DC+ / AC
382	19250	3855	3875	DC+ / AC
384	19350	3875	3895	DC+ / AC
386	19450	3895	3915	DC+ / AC
388	19550	3915	3935	DC+ / AC
390	19650	3935	3955	DC+ / AC
392	19750	3955	3975	DC+ / AC
394	19850	3975	3995	DC+ / AC
396	19950	3995	4015	DC+ / AC
398	20050	4015	4035	DC+ / AC
400	20150	4035	4055	DC+ / AC
402	20250	4055	4075	DC+ / AC
404	20350	4075	4095	DC+ / AC
406	20450	4095	4115	DC+ / AC
408	20550	4115	4135	DC+ / AC
410	20650	4135	4155	DC+ / AC
412	20750	4155	4175	DC+ / AC
414	20850	4175	4195	DC+ / AC
416	20950	4195	4215	DC+ / AC
418	21050	4215	4235	DC+ / AC
420	21150	4235	4255	DC+ / AC
422	21250	4255	4275	DC+ / AC
424	21350	4275	4295	DC+ / AC
426	21450	4295	4315	DC+ / AC
428	21550	4315	4335	DC+ / AC
430	21650	4335	4355	DC+ / AC
432	21750	4355	4375	DC+ / AC
434	21850	4375	4395	DC+ / AC
436	21950	4395	4415	DC+ / AC
438	22050	4415	4435	DC+ / AC
440	22150	4435	4455	DC+ / AC
442	22250	4455	4475	DC+ / AC
444	22350	4475	4495	DC+ / AC
446	22450	4495	4515	DC+ / AC
448	22550	4515	4535	DC+ / AC
450	22650	4535	4555	DC+ / AC
452	22750	4555	4575	DC+ / AC
454	22850	4575	4595	DC+ / AC
456	22950	4595	4615	DC+ / AC
458	23050	4615	4635	DC+ / AC
460	23150	4635	4655	DC+ / AC
462	23250	4655	4675	DC+ / AC
464	23350	4675	4695	DC+ / AC
466	23450	4695	4715	DC+ / AC
468	23550	4715	4735	DC+ / AC
470	23650	4735	4755	DC+ / AC
472	23750	4755	4775	DC+ / AC
474	23850	4775	4795	DC+ / AC
476	23950	4795	4815	DC+ / AC
478	24050	4815	4835	DC+ / AC
480	24150	4835	4855	DC+ / AC
482	24250	4855	4875	DC+ / AC
484	24350	4875	4895	DC+ / AC
486	24450	4895	4915	DC+ / AC
488	24550	4915	4935	DC+ / AC
490	24650	4935	4955	DC+ / AC
492	24750	4955	4975	DC+ / AC
494	24850	4975	4995	DC+ / AC
496	24950	4995	5015	DC+ / AC
498	25050	5015	5035	DC+ / AC
500	25150	5035	5055	DC+ / AC
502	25250	5055	5075	DC+ / AC
504	25350	5075	5095	DC+ / AC
506	25450	5095	5115	DC+ / AC
508	25550	5115	5135	DC+ / AC
510	25650	5135	5155	DC+ / AC
512	25750	5155		

Parameter Pengelasan

- *Welding Process : Shield Metal Arc Welding (SMAW)*
- *Type : Manual*
- *Joint Design : Butt Joint, Single 'V' Groove*
- *Base Metal : ASTM A36*
- *Groove : 1-3 mm*
- *Filler Metal :*
 - ❖ *AWS no. (Classification) : E 7016 root, filler & capping*
 - ❖ *Diameters : 2.6 mm dan 3.2 mm*
 - ❖ *Welding Position : 1 G (horizontal position)*
- *Interpass Temperature : -*
- *Current (AC or DC) : DC*
- *Polarity : - ve*
- *Amperage (Range) : 0 – 200 Ampere & Voltage (Range) : 20 – 50 V*
- *String or Weave Bead : Both*
- *Initial and Interpass Cleaning : Chipping, Brushing and Grinding*
- *Travel Of Speed : 20 – 150 mm/minute*

Proses & Skema Pengerjaan Gouging

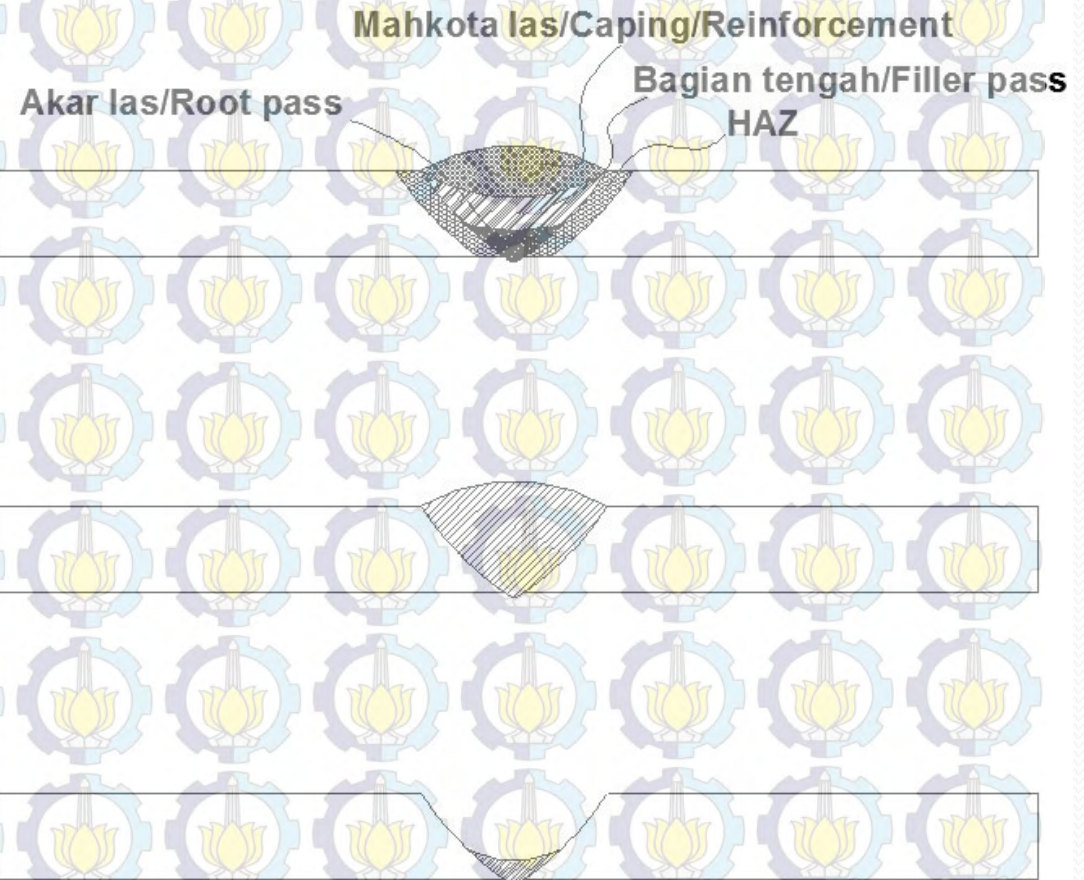
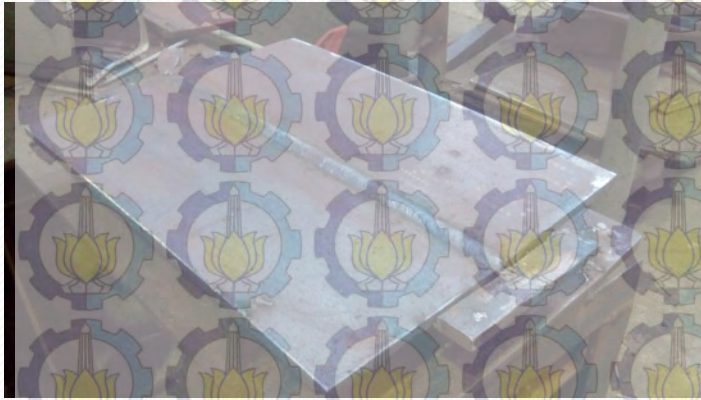


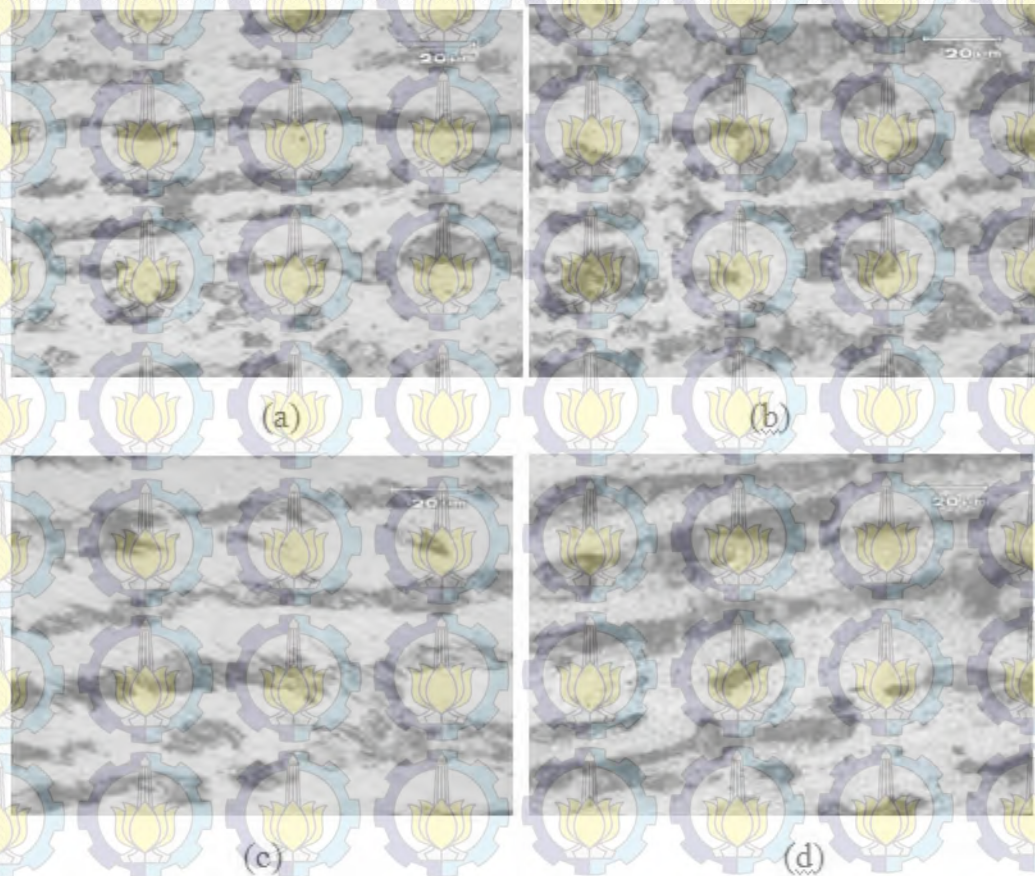
Diagram illustrating the layout of concrete specimens for material testing, showing dimensions and specimen types.

Specimen Layout and Dimensions:

- Overall Dimensions:** 3000 mm (Width) x 4000 mm (Length).
- Specimen Types and Dimensions:**
 - Spesimen Tarik (Tension Specimens):** 300 mm x 300 mm.
 - Spesimen Kekerasan (Hardness Specimens):** 100 mm x 100 mm.
 - Spesimen Makro (Macro Specimens):** 100 mm x 100 mm.
 - Spesimen Mikro (Micro Specimens):** 100 mm x 100 mm.
 - Spesimen Tegangan Sisa (Residual Stress Specimens):** 100 mm x 100 mm.
- Spacing and Arrangement:**
 - Specimens are arranged in a grid pattern.
 - Spacing between specimens is 100 mm.
 - Spacing between rows is 150 mm.
 - Spacing between columns is 150 mm.

Analisa Hasil Struktur Mikro

1. Perbandingan pada *Base Metal* perbesaran 1000 x



Gambar 4.3 Tampilan perbandingan struktur mikro *base metal* dari variabel pengelasan : (a) Tanpa *repair*, (b) *repair* 1x, (c) *repair* 2x, (d) *repair* 3x

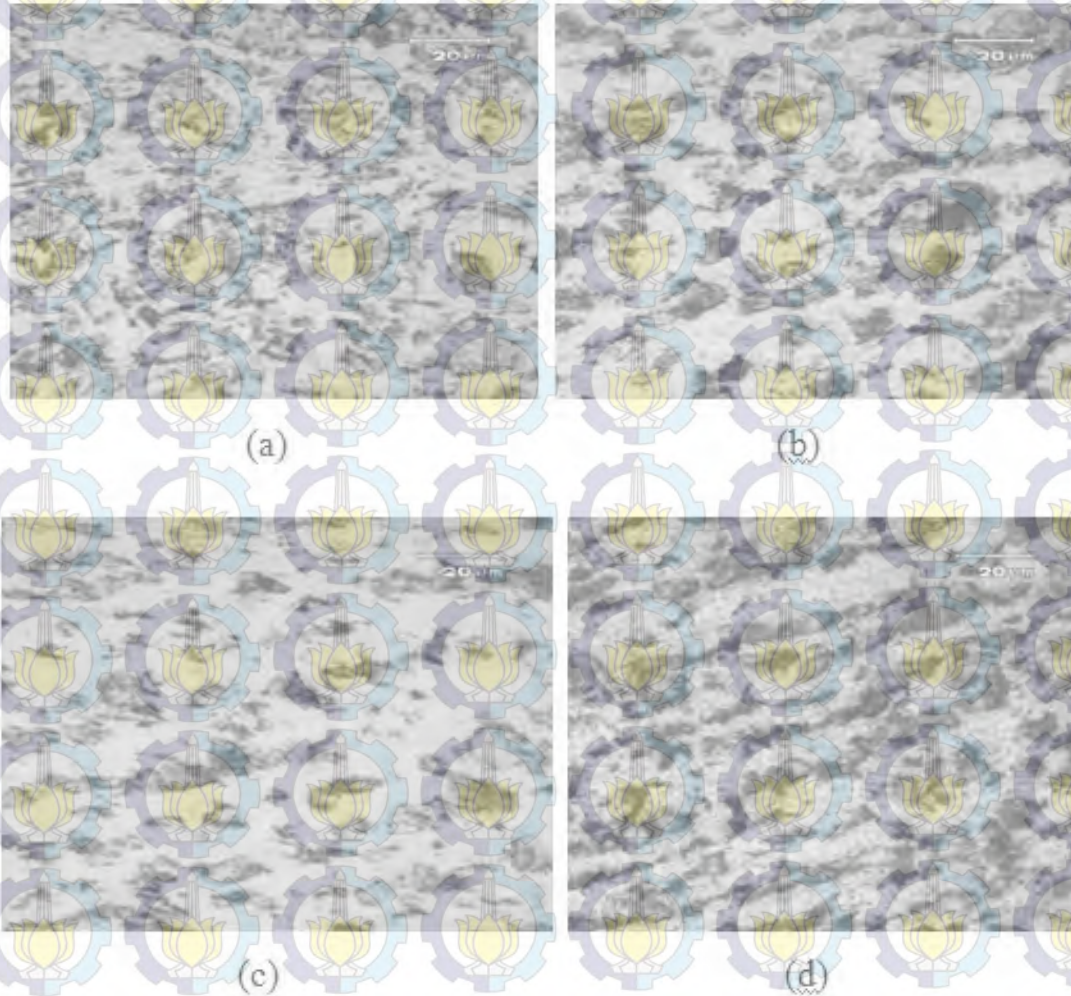
- Hasil olahan gambar mikro pada *base metal*

Tabel 4.1 Persentase perbandingan ferit dan perlit serta ukuran butir perlit pada *base metal*

Spesimen	Ferit (%)	Perlit (%)	Ukuran butir perlit (ASTM)
Tanpa <i>repair</i>	75.88	24.12	10.575
<i>Repair</i> 1x	65.88	34.12	10.692
<i>Repair</i> 2x	78.64	21.36	10.264
<i>Repair</i> 3x	67.43	32.57	10.317

Hasil olahan gambar mikro pada base metal yang asli dari *software* *TAimage* bisa dilihat pada **Lampiran E (E1 s/d E4)**

2. Perbandingan pada HAZ (*Heat Affected Zone*) perbesaran 1000 x



Gambar 4.4 Tampilan perbandingan struktur mikro HAZ dari variabel pengelasan : (a) Tanpa *repair*, (b) *repair* 1x, (c) *repair* 2x, (d) *repair* 3x

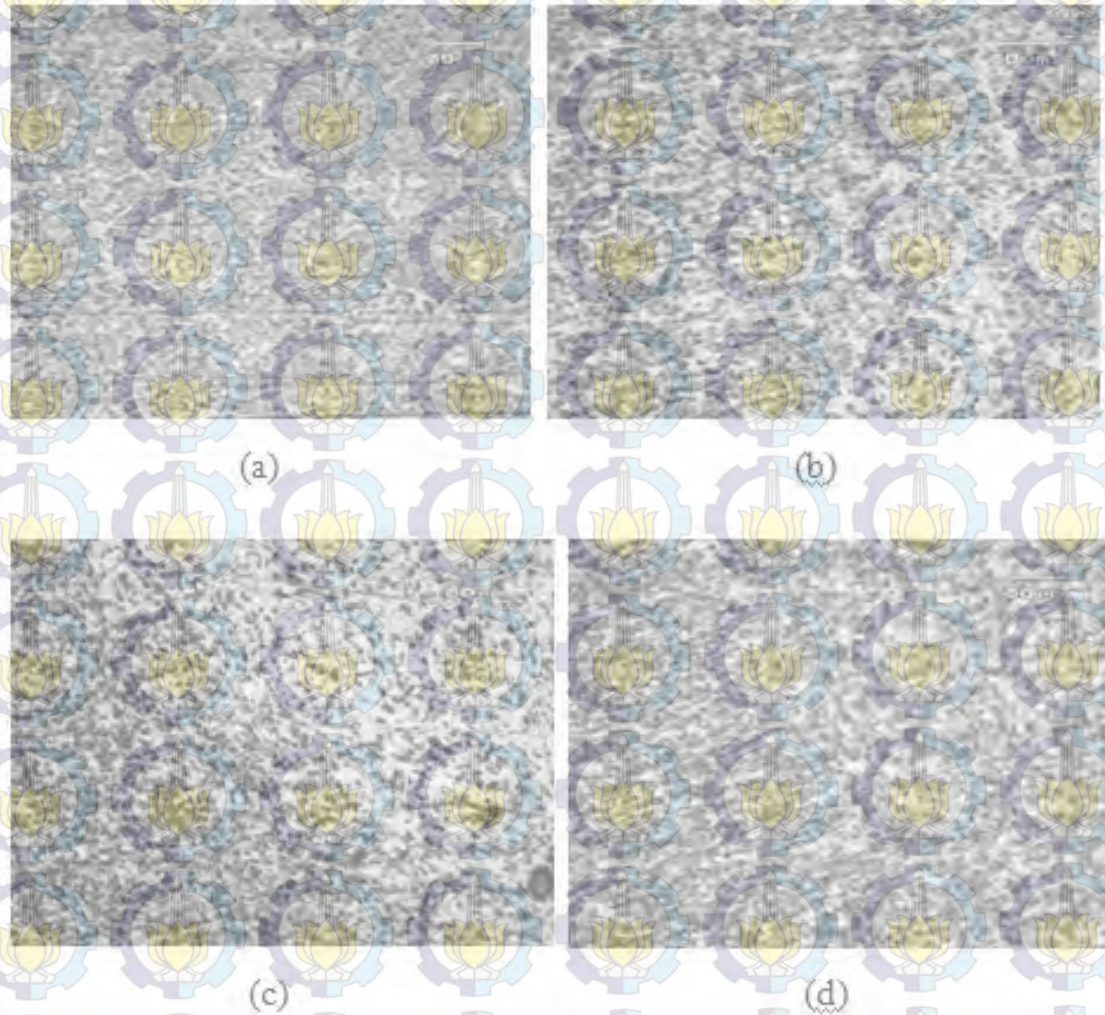
- Hasil olahan gambar mikro pada HAZ

Tabel 4.2 Persentase perbandingan ferit dan perlit serta ukuran butir perlit pada HAZ

Spesimen	Ferit (%)	Perlit (%)	Ukuran butir perlit (ASTM)
Tanpa <i>repair</i>	74.78	24.22	8.935
<i>Repair 1x</i>	73.74	26.26	9.080
<i>Repair 2x</i>	70.21	29.79	10.046
<i>Repair 3x</i>	64.08	35.92	10.212

Hasil olahan gambar mikro pada HAZ yang asli dari software *TAimage* bisa dilihat pada **Lampiran E (E5 s/d E8)**

2. Perbandingan pada *fusion line* perbesaran 200 x



Gambar 4.5 Tampilan perbandingan struktur mikro *fusion line* dari variabel pengelasan : (a) Tanpa *repair*, (b) *repair* 1x, (c) *repair* 2x, (d) *repair* 3x

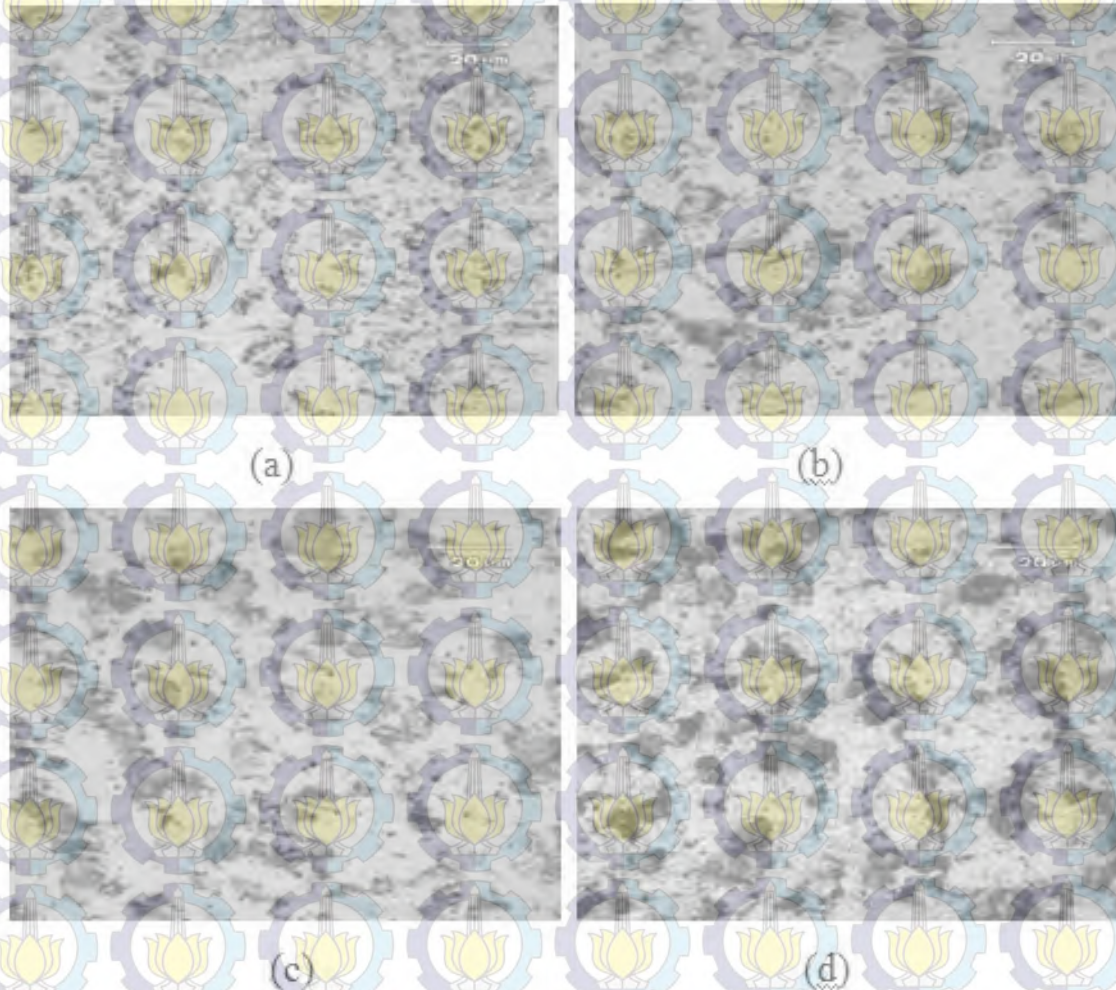
- Hasil olahan gambar mikro pada *fusion line*

Tabel 4.3 Persentase perbandingan ferit dan perlit serta ukuran butir perlit pada *fusion line*

Spesimen	Ferit (%)	Perlit (%)	Ukuran butir perlit (ASTM)
Tanpa <i>repair</i>	49.60	50.40	8.309
<i>Repair 1x</i>	57.13	42.87	8.242
<i>Repair 2x</i>	56.33	43.67	6.473
<i>Repair 3x</i>	49.54	50.54	6.367

Hasil olahan gambar mikro pada *fusion line* yang asli dari software *TAimage* bisa dilihat pada **Lampiran E (E9 s/d E12)**

2. Perbandingan pada *weld metal* perbesaran 1000 x



Gambar 4.6 Tampilan perbandingan struktur mikro *weld metal* dari variabel pengelasan : (a) Tanpa *repair*, (b) *repair* 1x, (c) *repair* 2x, (d) *repair* 3x

- Hasil olahan gambar mikro pada *weld metal*

Tabel 4.3 Persentase perbandingan ferit dan perlit serta ukuran butir perlit pada *fusion line*

Spesimen	Ferit (%)	Perlit (%)	Ukuran butir perlit (ASTM)
Tanpa <i>repair</i>	49.60	50.40	8.309
<i>Repair 1x</i>	57.13	42.87	8.242
<i>Repair 2x</i>	56.33	43.67	6.473
<i>Repair 3x</i>	49.54	50.54	6.367

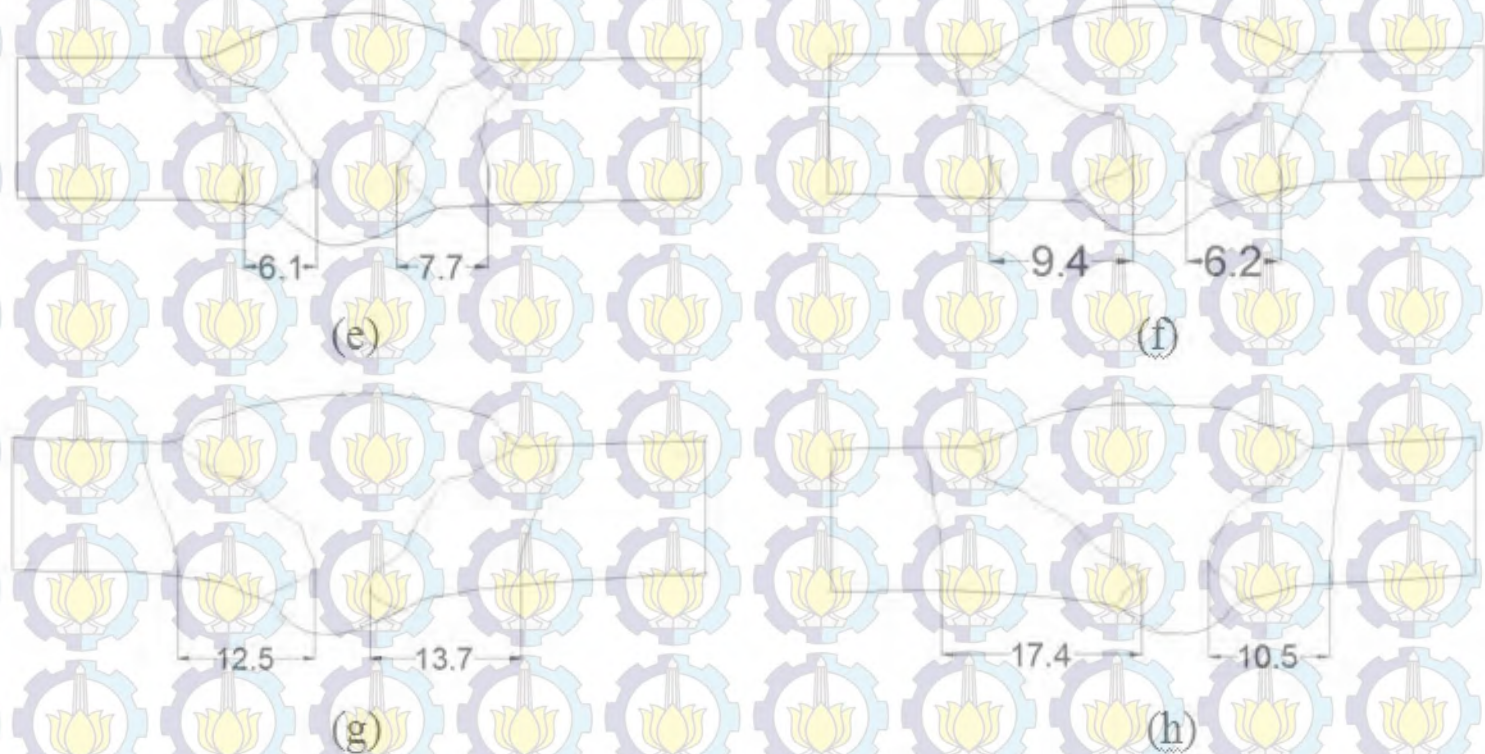
Hasil olahan gambar mikro pada *weld metal* yang asli dari *software TAIMAGE* bisa dilihat pada **Lampiran E (E13 s/d E16)**

Analisa Hasil Makro etsa



Gambar 4.1 Tampilan perbandingan makro etsa dari variabel pengelasan : (a) Tanpa repair, (b) repair 1x, (c) repair 2x, (d) repair 3x

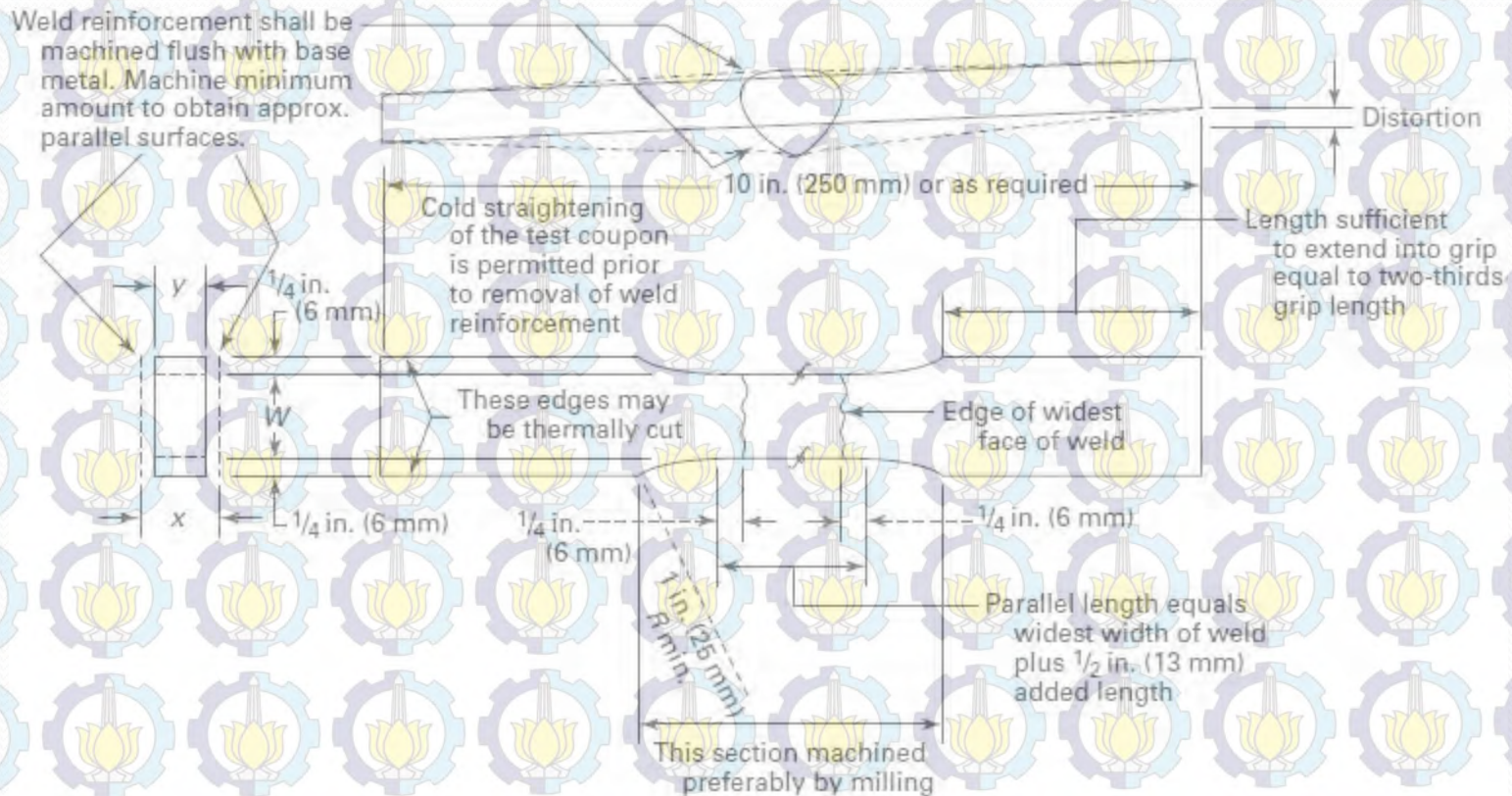
● Hasil *plotting* makro etsa



Gambar 4.2 Tampilan perbandingan *plotting* makro etsa dari variabel pengelasan : (e) Tanpa *repair*, (f) *repair* 1x, (g) *repair* 2x, (h) *repair* 3x

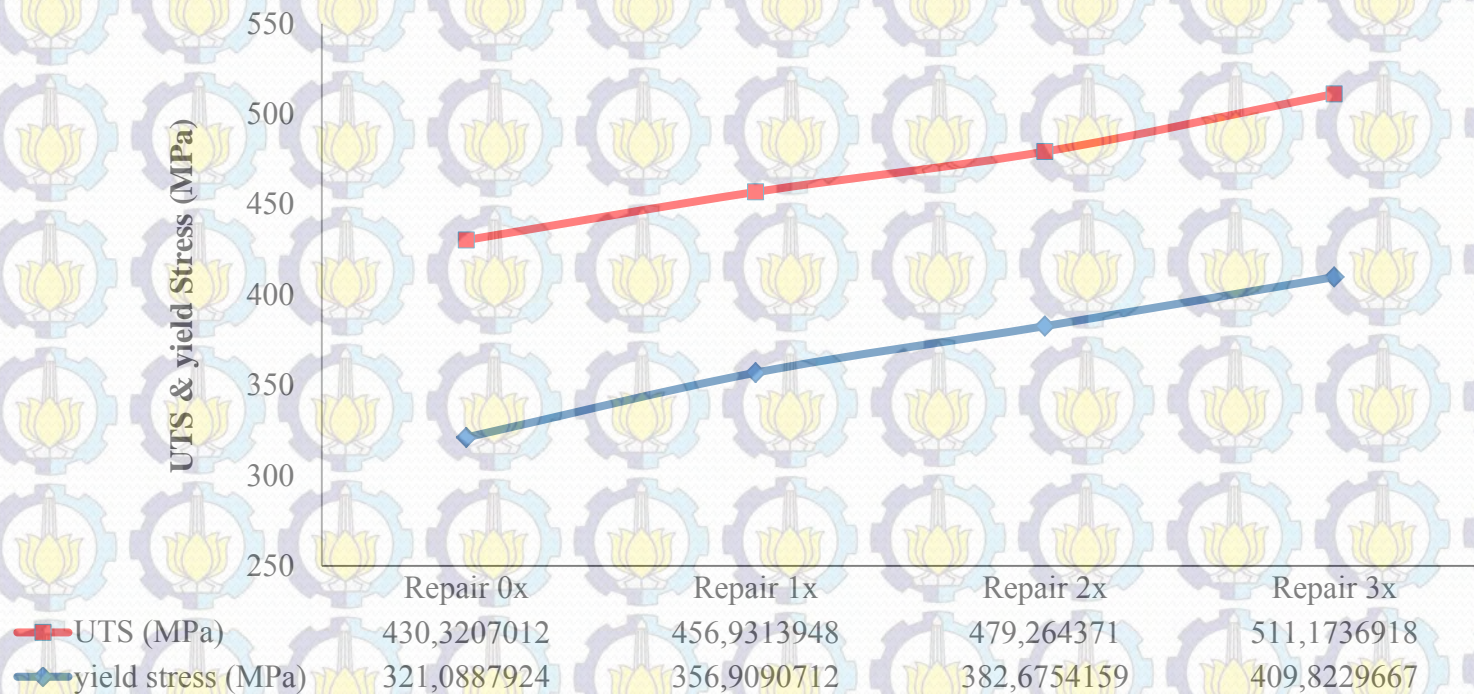
Dimensi Spesimen Tarik

- Rujukan pembuatan dimensi speimen tarik mengacu pada standar ASME IX

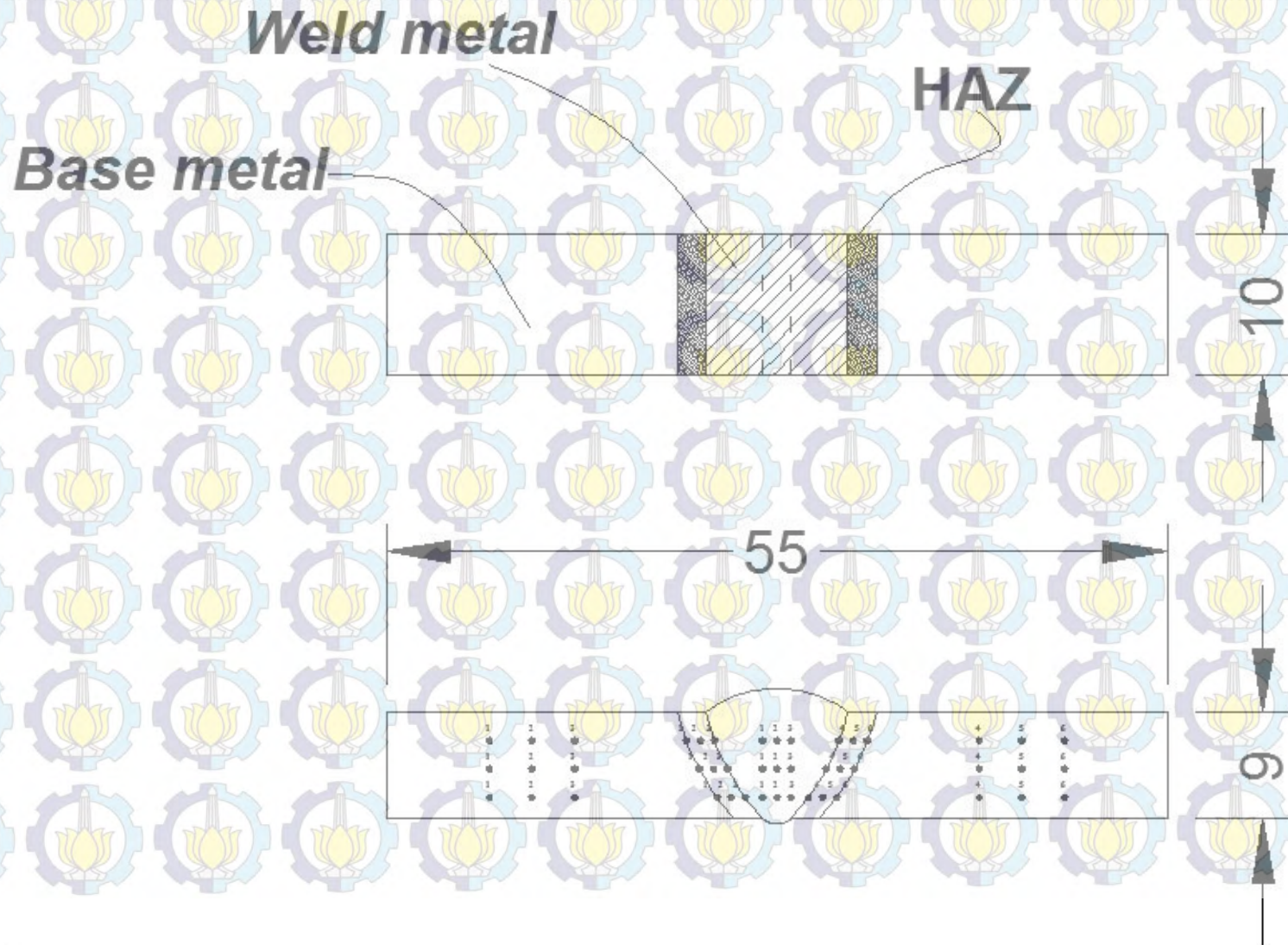


Analisa Hasil Pengujian Tarik

Data Nilai Rata-Rata Hasil Pengujian Tarik Keseluruhan

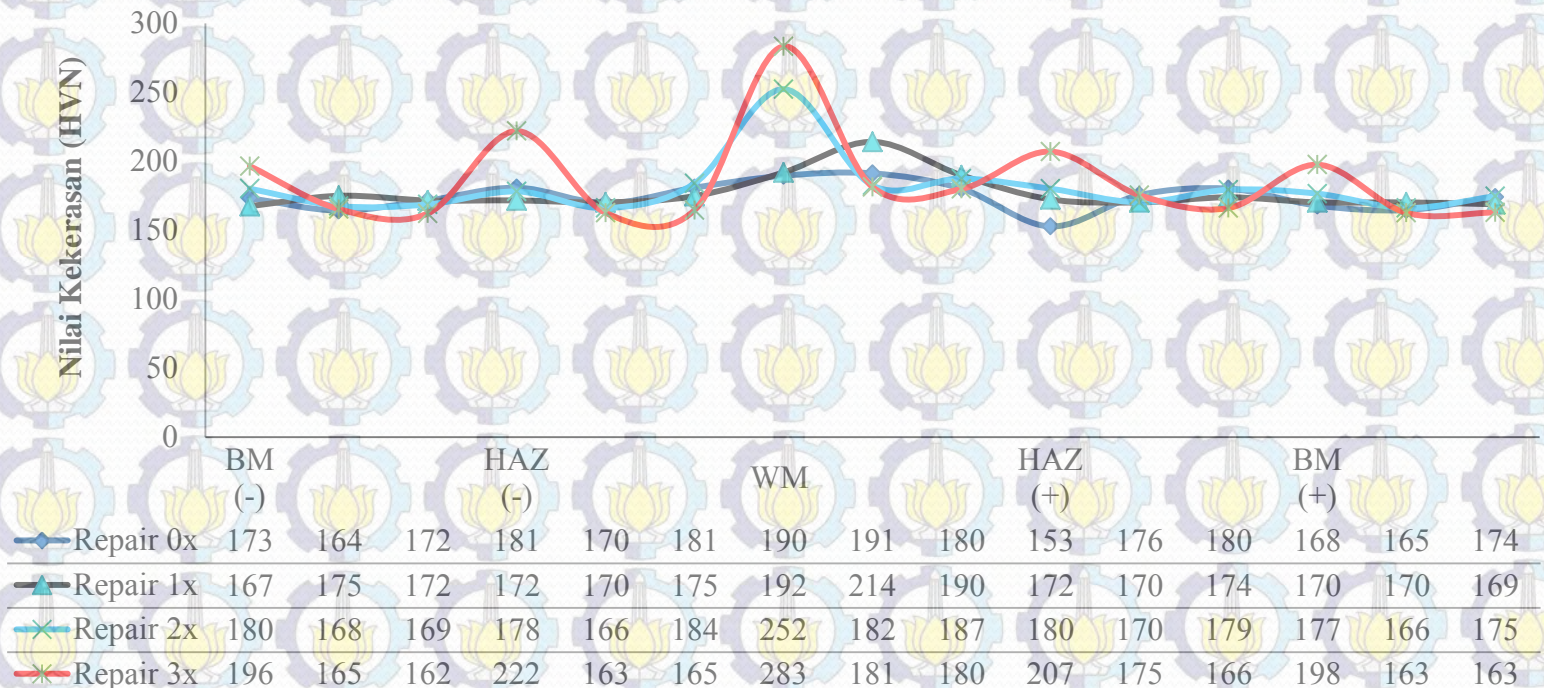


Skema Pengambilan Titik uji Kekerasan



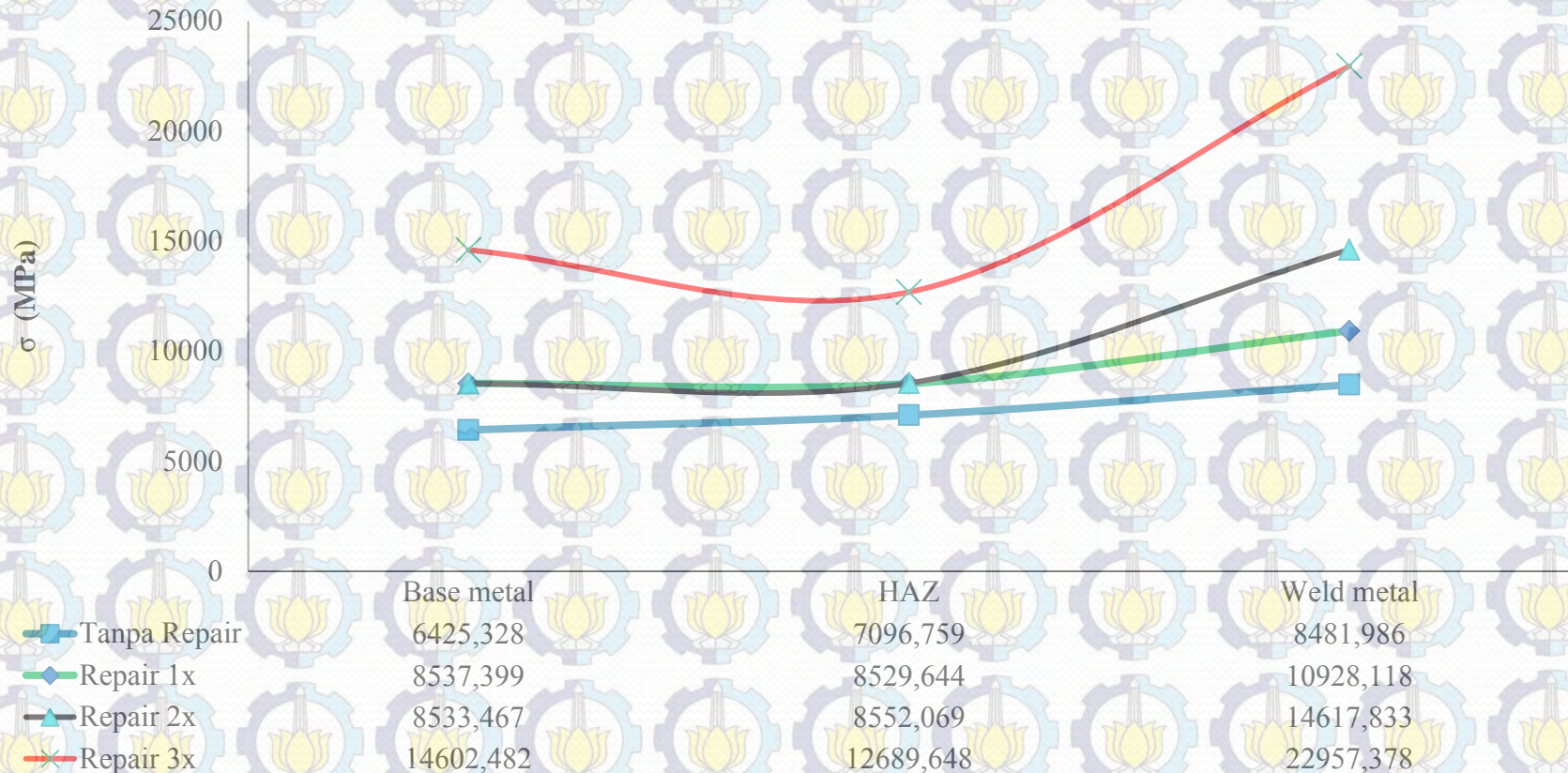
Analisa Hasil Pengujian Kekerasan

Nilai Rata-Rata Total Kekerasan Pada Masing-Masing Spesimen



Analisa Hasil Pengujian Tegangan Sisa Menggunakan XRD

Grafik Nilai Rata-Rata Tegangan Sisa Total



Kesimpulan

1. Pada tampilan makro terjadi peningkatan lebar rata-rata HAZ sebesar 10.4% pada masing-masing variabel yang menandakan pertambahan lebar ini mengindikasikan adanya perubahan ukuran butir pada HAZ dikarenakan pada daerah ini merupakan daerah kritis yang terpapar panas mencapai temperature austenite yang merambta dari arah *weld metal*. Pada tampilan struktur mikro memberikan tampilan yang memperjelas hasil ukuran butir yang mulai berubah dimensinya baik hanya terkena panas pengelasan, yaitu yang terdapat pada spesimen tanpa *repair*, maupun spesimen lain yang mengalami kombinasi panas dari proses *gouging* untuk *repair*. Sehingga, dapat dipastikan dengan adanya perubahan dimensi butir pada struktur mikro akan berpengaruh juga pada nilai mekanik pada masing-masing spesimen.

2. Terdapat pengaruh dari banyaknya proses pengelasan *multiple repair* pada baja ASTM A36 terhadap nilai uji tarik pada masing-masing variabel spesimen yang menunjukkan kenaikan rata-rata sebesar 1.05% hingga nilai tertinggi dicapai pada spesimen *repair 3x*, yaitu sebesar 511.173 MPa. Hal ini membuktikan bahwa banyaknya jumlah *repair* yang dilakukan hingga mencapai 3x akan meningkatkan nilai uji tariknya, tetapi secara keseluruhan rata-rata nilai tarik bila merujuk pada ASME IX 2010 masih memenuhi kualifikasi yang salah satu poinnya mensyaratkan nilai uji tarik sambungan las minimal sama dengan material induk, meskipun dilain sisi masukan panas yang diterima pada masing-masing spesimen juga semakin besar akibat proses *repair*.

3. Terdapat pengaruh dari banyaknya proses pengelasan *multiple repair* pada baja ASTM A36 terhadap nilai uji kekerasan pada masing-masing variabel spesimen yang menunjukkan kenaikan persentase nilai rata-rata sebesar 0.9% untuk area *base metal*, 1.14% untuk HAZ dan 9.3% untuk *weld metal*. Rata-rata nilai kekerasan tertiggi dicapai pada spesimen *repair* 3x, yaitu sebesar 174.52 HVN, 182.95 HVN dan 214.87 HVN pada masing area *base metal*, HAZ dan *weld metal*. Hal ini membuktikan bahwa banyaknya jumlah *repair* yang dilakukan hingga mencapai 3x akan meningkatkan nilai uji kekerasannya. Khusus dalam hal ini, semakin banyaknya jumlah *repair* yang diterima juga menyebabkan nilai kekerasan pada *weld metal* meningkat drastis. Hal ini juga menandakan perubahan nilai kekerasan sebagai akibat dari perubahan ukuran butir pada masing-masing struktur mikro disetiap variabel sebagai akibat dari paparan panas baik dari proses pengelasan, proses *gouging* untuk *repair* maupun kombinasi keduanya.

4. Terdapat pengaruh dari banyaknya proses pengelasan *multiple repair* pada baja ASTM A36 terhadap nilai tegangan sisa pada masing-masing variabel spesimen. Nilai tegangan tertinggi secara umum terjadi pada area *weld metal*, meskipun pada spesimen *repair 3x* nilai rata-rata tegangan sisa di seluruh area baik pada *base metal*, HAZ dan *weld metal* mengalami peningkatan yang paling drastis bila dibandingkan dengan variabel yang lain. Hal ini mengindikasikan penambahan jumlah *repair* juga akan mengakibatkan semakin tingginya nilai tegangan sisa yang dihasilkan. Berdasarkan hasil pengujian tegangan sisa dalam penelitian ini pula dapat terungkap bahwa anjuran untuk banyaknya *repair* sebaiknya dilakukan sebanyak 2x dikarenakan nilai tegangan sisa yang terlalu tinggi yang dihasilkan pada spesimen *repair 3x*, meskipun nilai uji tarik spesimen *repair 3x* masih memenuhi kualifikasi yang di syaratkan oleh ketentuan standar ASME IX 2010.

Saran

1. Pada penelitian ini, posisi pengelasan adalah 1G (datar). Untuk penelitian selanjutnya, dapat dilakukan dalam posisi pengelasan yang lainnya seperti 2G, 3G dan 4G
2. Pada penelitian ini melakukan proses *repair* dengan metode *gouging* atau menggunakan proses termal, penelitian berikutnya dapat dilakukan dengan *repair* menggunakan proses permesinan atau lainnya
3. Pada penelitian ini melakukan proses *repair* dengan rentang waktu jeda 1 hari, penelitian berikutnya dapat divariasikan rentang jeda waktunya
4. Penelitian lebih lanjut, dapat dilakukan dengan menggunakan variasi elektroda lain.
5. Hendaknya dilakukan pengujian yang lainnya seperti uji *fracture*, *toughness*, uji *fatigue* dan lain sebagainya



**Sekian Terima Kasih Atas
Perhatiannya**